



**Rodrigo André Lagarto Redondeiro**

Mestrado integrado em Engenharia e Gestão Industrial

**Estudo comparativo de dois sistemas  
de monitorização da qualidade do  
cravamento em terminais para a  
indústria automóvel**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia  
e Gestão Industrial

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,  
Professora Auxiliar, FCT/UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Martin Miquel Cabeças

Vogais: Prof. Doutor José Fernando Gomes Requeijo

Engenheiro Filipe Fernandes da Anunciação

Prof. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Março de 2017**



## **Direitos de cópia**

### **Estudo comparativo de dois sistemas de monitorização da qualidade do cravamento em terminais para a indústria automóvel**

“Copyright” Rodrigo André Lagarto Redondeiro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou em forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



## Agradecimentos

Gostaria de agradecer à Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos por toda a ajuda, apoio e orientação dada ao longo da realização da presente dissertação e percurso de formação. E por todo o conhecimento transmitido que permitiu enriquecer o trabalho.

Ao engenheiro Filipe Anunciação, engenheiro Rui Dias e Engenheiro Bruno Nascimento, o meu grande obrigado pelo apoio dado ao longo do estágio e projeto desenvolvido em conjunto, sem os quais o conhecimento adquirido e aplicado posteriormente nunca teria sido possível.

À Delphi, que me deu a oportunidade quando mais ninguém a parecia dar, e me acolheu da melhor forma possível durante os meses presentes na casa.

À minha namorada, que esteve sempre presente e me disse constantemente ‘tu consegues’ e não me deixou desmotivar.

E por fim, agradeço aos meus pais pois sem eles não estava aqui.



## **Resumo**

A indústria automóvel é cada vez mais especializada e automatizada, e com a melhoria contínua dos seus processos como um fator constantemente presente na produção. Com cada vez mais componentes e mecanismos de carácter electrónico utilizados para a comunicação de todo o sistema automóvel e seu funcionamento, é crucial não haver falhas eléctricas entre as diversas partes equipadas.

O cravamento de terminais metálicos a fios condutores eléctricos é um dos processos produtivos utilizados na indústria e tecnologia da produção automóvel, e um dos mais importantes para a necessidade de comunicação electrónica existente.

Este trabalho estuda os erros, ou não conformidades, encontradas no processo produtivo de cravamento de terminais metálicos na indústria automóvel. São apresentados e estudados, dois sistemas de monitorização de forças de cravamento, e realizados testes de monitorização de forças de cravamento para diferentes combinações de terminal-fio e áreas de secção de fio condutor eléctrico.

Em síntese, um novo sistema que faz a monitorização de erros de cravamento é apresentado e comparado com o sistema de monitorização de forças de cravamento atualmente utilizado na produção em fábrica, e aceite como superior ao antigo.

O objetivo principal é a redução de desperdício de matéria-prima e custos associados, bem como o aumento na qualidade do produto final.

Para a capacidade de medição do novo sistema de monitorização de forças de cravamento estudado no presente trabalho, é feito um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade e ainda das suas características dinâmicas segundo o método de Taguchi.

## **Palavras-chave**

Cravamento, Erros de cravamentos, Monitorização, Sistema de monitorização de forças, Estudo R&R, Características dinâmicas de Taguchi, Indústria Automóvel.





## **Abstract**

The automotive industry is becoming more specialized and automated with each passing day, and the continuous improvement of its processes a constant present factor in production methods. And with more and more components and mechanisms with electronic character equipped, used for the communication of the whole automobile system and its operation, it is crucial not to have electrical failures between the parts involved.

The crimping of terminals to electrical conductive wires is a production process used in the industry and technology of automotive production, and one of the most important for the existing need for electronic communication.

This paper studies the errors, or nonconformities, found in the productive process of crimping metallic terminals in the automotive industry. Two crimp force monitor systems are presented and studied, and crimp force monitoring tests are performed for different terminal-wire combinations and electric conductor cross-section areas.

In short, a new monitoring system for crimping errors is presented and compared to the crimp force monitoring system currently used in factory production.

The main objective is the waste reduction of used materials and associated costs, as well as the increase in the quality of the final product.

For the measurement capability of the new crimp force monitor studied in the present work, it is performed a repeatability and reproducibility study, and its dynamic characteristics according to the Taguchi method studied as well.

## **Key Words**

Crimping, Crimping errors, Monitoring, Crimp force monitors, R&R study, Taguchi dynamic characteristics, Automotive Industry.



# Conteúdo

1.	Introdução .....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Metodologia .....	4
1.4	Estrutura da dissertação .....	5
2.	Fundamentos Teóricos .....	7
2.1	Cravamento de terminais .....	7
2.1.1	Resistência mecânica e elétrica.....	8
2.1.2	Estripadora de cabo .....	9
2.1.3	Ferramenta de cravar pneumática (GMD) .....	10
2.1.4	Prensa .....	11
2.1.5	Micrómetro .....	12
2.1.6	Terminais.....	12
2.1.7	Fios ou Cabos multifilares .....	14
2.2	Deteção de falhas de cravamento ou não conformidades - Regras .....	15
2.2.1	Cravamento de multifilares.....	16
2.2.2	Cravamento de isolamento .....	17
2.2.3	Corpo do terminal .....	17
2.2.4	Janela.....	17
2.3	Sistemas de monitorização de forças de cravamento .....	18
2.4	Capacidade de sistemas de medição .....	20
2.4.1	Estudo R&R .....	20
2.5	Métodos de Taguchi com Características Dinâmicas.....	24
3.	Metodologias de Investigação .....	29
3.1	Método de Estudo ou Teste de monitorização .....	29
3.1.2	Preparação do Cravamento e Ferramenta de Cravamento.....	30
3.2	Sistemas de monitorização de forças de cravamento estudados.....	32

3.3.2	Sistema de monitorização de forças A .....	32
3.3.3	Sistema de monitorização de forças B .....	34
3.3.4	Características de deteção de cravamentos não conformes por zonas.....	36
3.3	Estudo de um novo método de teste aos sistemas de monitorização .....	36
3.4	Estudo comparativo dos sistemas de monitorização de forças de cravamento .....	40
3.5	Estudo do limite ideal de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B .....	44
3.6	Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade .....	45
3.7	Estudo das características dinâmicas de Taguchi.....	48
4.	Resultados e Discussão .....	51
4.1	Estudo de um novo método de teste aos sistemas de monitorização .....	51
4.1.1	Diferença entre médias para o sistema de monitorização de forças A .....	52
4.1.2	Diferença entre médias para o sistema de monitorização de forças B.....	54
4.2	Estudo comparativo dos sistemas de monitorização de forças por combinação terminal-fio .....	56
4.2.1	Combinação terminal-fio 0,13 mm <sup>2</sup> .....	56
4.2.2	Combinação terminal-fio 0,35 mm <sup>2</sup> .....	57
4.2.3	Combinação terminal-fio 0,50 mm <sup>2</sup> .....	59
4.2.4	Combinação terminal-fio 1 mm <sup>2</sup> .....	60
4.3	Estudo do limite ideal de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B .....	62
4.4	Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) .....	67
4.5	Estudo das características dinâmicas de Taguchi.....	72
4.5.1	Razão sinal-ruído - Sistema de monitorização de forças de cravamento A .....	72
4.5.2	Razão sinal-ruído - Sistema de monitorização de forças de cravamento B .....	75
5.	Conclusão.....	79
	Referências Bibliográficas .....	83

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Terminal cravado .....	7
Figura 2.2 - Estripadora de cabo manual .....	9
Figura 2.3 - Ferramenta de cravar pneumática (GMD).....	10
Figura 2.4 - Spare Parts .....	10
Figura 2.5 - Prensa de Cravamento Manual .....	11
Figura 2.6 - Micrómetro .....	12
Figura 2.7 - Fita de terminais metálicos (open barrel).....	13
Figura 2.8 - Constituição de um terminal .....	13
Figura 2.9 - Exemplos de cabos .....	14
Figura 2.10 - Processo de Cravamento .....	15
Figura 2.11 - Análise micrográfica na zona das garras do cobre .....	16
Figura 2.12 – Tolerâncias das regras .....	16
Figura 2.13 - Janela de cravamento conforme e não conforme.....	18
Figura 2.14 - Exemplo de Sistema de Monitorização .....	19
Figura 2.15 – Plano Hierárquico de experiências .....	21
Figura 2.16 – Representação das componentes de variação num sistema de medição.....	24
Figura 3.1 – Esquema de um corte transversal da ferramenta de cravar pneumática, zona de cravamento .....	30
Figura 3.2 - Sequência de um cravamento em conformidade .....	31
Figura 3.3 - Sistema de monitorização de forças A .....	33
Figura 3.4 - Curva de referência vs. Curva de cravamento.....	33
Figura 3.5 - Sistema de monitorização de forças B .....	35
Figura 3.6 - Curva de referência vs. Curva de cravamento.....	35
Figura 3.7 - Gráfico resultante de um teste de monitorização .....	41
Figura 3.8 - Picos de força média por tipos de erro .....	43
Figura 3.9 - Médias do erro total por cada tipo de erro de cravamento.....	44
Figura 4.1 – Combinação terminal-fio 0,13 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A.....	56
Figura 4.2 – Combinação terminal-fio 0,13 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B .....	57
Figura 4.3 – Combinação terminal-fio 0,35 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A.....	58
Figura 4.4 – Combinação terminal-fio 0,35 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B .....	58
Figura 4.5 – Combinação terminal-fio 0,50 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A.....	59
Figura 4.6 – Combinação terminal-fio 0,50 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B .....	59
Figura 4.7 – Combinação terminal-fio 0,50 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A.....	61
Figura 4.8 – Combinação terminal-fio 0,50 mm <sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B .....	61

Figura 4.9 – Curva Normais para os valores resultantes do teste a combinação terminal fio 1 mm <sup>2</sup> com CDA-L = 100 e CDA-L = 125.....	64
Figura 4.10 – Componentes de variação.....	70
Figura 4.11 – Amplitude por operador-lote .....	70
Figura 4.12 – Médias por operador-lote .....	70
Figura 4.13 – Resultados individuais por operador-lote .....	71
Figura 4.14 – Resultados por operador.....	71
Figura 4.15 – Sinal-Resposta Sistema de monitorização de forças A .....	74
Figura 4.16 – Sinal resposta Sistema de monitorização de forças B .....	77

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Tipo de prensa para cravamento .....	12
Tabela 2.2 – Cálculos para ANOVA R&R.....	22
Tabela 3.1 - Detecção padrão esperada na monitorização .....	36
Tabela 3.2 - Dimensão das amostras recolhidas .....	38
Tabela 3.3 - Combinações Terminal-Fio estudadas para o novo método de testes .....	38
Tabela 3.4 - Combinações Terminal-Fio estudadas para os sistemas de monitorização .....	41
Tabela 3.5 - Detecção de erros pela falta de multifilares.....	43
Tabela 3.6 - Combinação Terminal-Fio estudo R&R .....	46
Tabela 3.7 - Experiências do Estudo R&R .....	46
Tabela 3.8 – Cálculo das percentagens de variação e tolerância.....	47
Tabela 3.9 - Combinações Terminal-Fio características dinâmicas de Taguchi .....	48
Tabela 3.10 - Experiências do Estudo de características dinâmicas de Taguchi .....	49
Tabela 4.1 – Médias para os erros dos testes aos sistemas de monitorização A e B .....	52
Tabela 4.2 – Desvios padrão do erro dos testes aos sistemas de monitorização A e B .....	52
Tabela 4.3 - Teste à diferença entre variâncias no sistema de monitorização A .....	53
Tabela 4.4 - Teste à diferença entre médias no sistema de monitorização A .....	54
Tabela 4.5 - Teste à diferença entre variâncias no sistema de monitorização B .....	55
Tabela 4.6 - Teste à diferença entre médias no sistema de monitorização B .....	55
Tabela 4.7 – Início para a deteção de não conformidades por sistema de monitorização de forças de cravamento .....	62
Tabela 4.8 – Falta de multifilares necessária para a deteção de cravamentos não conformes.....	63
Tabela 4.9 – Limite superior de especificação para as diferentes combinações terminal-fio.....	63
Tabela 4.10 – Probabilidades de não detetar não conformidades para a falta de 1 multifilar .....	65
Tabela 4.11 - Probabilidades de não detetar não conformidades para a falta de 2 multifilares ...	66
Tabela 4.12 – Dados recolhidos - Estudo R&R .....	67
Tabela 4.13 – ANOVA R&R .....	67
Tabela 4.14 – Percentagens de contribuição de variação e tolerância Estudo R&R .....	69
Tabela 4.15 – Dados recolhidos - características dinâmicas sistema de monitorização A .....	72
Tabela 4.16 – Dados recolhidos - características dinâmicas sistema de monitorização B .....	75





## Abreviaturas e Símbolos

ANOVA	Análise de Variância
$C_{pk}$	Índice de capacidade do processo
$F_0$	Estatística da análise de variância de um fator
g.l.	Graus de Liberdade
GMD	Global Mini-Die
LIE	Limite Inferior de Especificação
LSE	Limite Superior de Especificação
M	Sinal de entrada da característica dinâmica
$M_s$	Quadrados médios ou variâncias
n	Dimensão da amostra
NC	Número de classes
PF	Força de pico
PVC	Material de isolamento
$r_0$	Número de observações para cada nível do fator sinal
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
S/N	Razão Sinal-Ruído
SS	Soma dos quadrados
$S_\beta$	Variação causada pelo efeito linear
$SS_A$	Soma dos quadrados do operador
$SS_{B(A)}$	Soma dos quadrados do lote hierarquizado ao operador
$SS_E$	Soma dos quadrados do erro
$SS_t$	Soma dos quadrados total
TOL	Tolerância
$V_e$	Variância do erro
VE	Variação no equipamento ou repetibilidade
VO	Variação no operador ou reprodutibilidade
VP	Variância dos lotes hierarquizados ao operador
VT	Variação total
$y_{ijk}$	Observação da medição k, relativa à experiência j, pelo operador i
$\alpha$	Nível de significância

$\beta$	Declive da reta
$\varepsilon$	Erro

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação

A indústria automóvel é cada vez mais especializada e automatizada, e a preocupação com a melhoria contínua dos seus processos é um fator constantemente presente no dia-a-dia e nas suas fábricas e produção, onde estão presentes cada vez mais componentes e mecanismos equipados de carácter eletrónico, utilizados para a comunicação de todo o sistema automóvel e seu funcionamento, como sensores, *airbags*, luzes, etc.

O cravamento de terminais metálicos em fios condutores elétricos, ou cabos multifilares, é um dos muitos processos produtivos utilizados na indústria e tecnologia da produção automóvel, e um dos mais importantes para a necessidade eletrónica atualmente existente.

É assim vital que toda a cablagem elétrica presente nas viaturas automóveis se apresente em perfeitas condições de funcionamento e que efetivamente desempenhe sem restrições o objetivo para o qual foi desenvolvida, refletindo-se esta necessidade tanto para dispositivos de carácter de conforto como para dispositivos de segurança (Nascimento, 2016), e de uma forma fiável.

Embora este não seja ainda um processo totalmente automatizado, maioritariamente manual, a preocupação ou importância existente para com o seu resultado final não será de menor importância. Pelo contrário, à produção de carácter manual vem impor-se a necessidade de haver um controlo maior e individual de cravamentos de cada combinação de terminal e fio produzidos. Produção manual vem indicar existência de variação superior nos processos face à existente na produção automatizada, onde a margem para erros presente é inferior. Assim, uma maior margem para erros indica uma maior necessidade de controlo.

A importância do cravamento de terminais ser distintamente realizado em conformidade e de forma fiável vem trazer ainda mais peso no que diz respeito à segurança automóvel, uma vez que estes terminais fazem a ligação entre todos os pontos elétricos constituintes do sistema eletrónico de um automóvel. Uma única falha pode conduzir a consequências catastróficas para os equipamentos e utilizador do veículo. É assim necessário um controlo contínuo de produção para cada terminal metálico cravado.

Para fazer o controlo de produção de cravamento de terminais, e determinar a sua produção em conformidade ou não conformidade, existem assim equipamentos de monitorização específicos para a monitorização de cravamentos. Estes sistemas de monitorização fazem a

comparação entre cada cravamento individual efetuado face a um conhecido de referência previamente estabelecido como o padrão. A comparação é feita tendo em conta parâmetros de monitorização, como a força aplicada durante o processo de cravamento de cada terminal metálico e o tempo total necessário para realizar cada um dos mesmos, por meio de sensores instalados para o controlo e registo contínuo do processo. Com base nesses registos, são assim criadas curvas de força no tempo por cada cravamento, e comparadas com uma curva de referência criada ao iniciar cada processo produtivo. A diferença entre curvas de força define a conformidade do cravamento, não ignorando para além disso critérios adicionais estabelecidos pela empresa.

Evitar que cravamentos não conformes sejam não identificados e alcancem o conjunto da produção final e aplicados ao conjunto automóvel, é crucial não só para o funcionamento perfeito e em boas condições procurado mas também para a confiança no produto e fabricante por parte dos clientes finais.

Assim, para aumentar a confiança no produto é necessário existir a melhoria contínua na monitorização atualmente utilizada, garantindo cada vez mais um menor número de erros ou não conformidades. Sistemas de monitorização de cravamento novos e aperfeiçoados devem ser estudados e compreendidos quanto à sua capacidade para a substituição de antigos sistemas. Uma organização que não aplica uma melhoria continua nos seus processos, é uma empresa não competitiva e sustentável.

Nesse sentido, é estudado um novo sistema de monitorização de cravamento de terminais metálicos, e feita a sua comparação com o atual sistema de monitorização para a qualidade em cravamentos instalado nas plantas de produção.

## **1.2 Objetivos**

O trabalho realizado nesta dissertação tem diversos objetivos, focando-se sempre na melhoria do processo de deteção de erros ou não conformidades para o cravamento de terminais em fios elétricos, utilizados no fabrico de componentes na indústria automóvel.

Inicialmente, um dos grandes objetivos é perceber toda a tecnologia do cravamento e o seu funcionamento, e o que implica em termos de matéria indispensável à sua produção. Uma pesquisa teórica sobre os procedimentos necessários à aplicação do estudo, para além do conhecimento prático já adquirido ao longo do trabalho, é essencial.

Dentro dos objetivos específicos destacam-se, o estudo do sistema de monitorização existente face ao novo sistema em investigação quanto à sua capacidade para distinguir bons e

maus cravamentos de terminais, fazendo uma comparação e percebendo o funcionamento dos mesmos através de testes de monitorização. Possíveis ideias aplicáveis para melhorias, por forma a incrementar a capacidade de deteção de erros no posto de trabalho e simultaneamente a capacidade de produção realizada. Comprovar a necessidade de substituição das unidades de monitorização existentes por as do novo sistema de monitorização de cravamentos em todas as fábricas do grupo caso se apresentem vantagens.

Outro objetivo e um desafio proposto pela empresa durante o decorrer do trabalho, consistiu em tentar alterar o método de procedimento do teste de monitorização padrão que é atualmente aplicado no estudo da capacidade de um sistema de monitorização de forças de cravamento. Passando este a um novo método que faz uso de metade do número de cravamentos de terminais, necessários de realizar por norma no método padrão, e sem alterar os resultados obtidos. Procura-se reduzir material e tempo, alcançando uma redução no desperdício total de matéria.

Para o novo sistema de monitorização de forças de cravamento estudado será aprofundada a necessidade de ser alterado o seu limite de deteção para o erro a partir do qual um cravamento é considerado não conforme, e procurar qual o valor do limite que de melhor se vai adequar tendo como base testes de monitorização de cravamentos efetuados ao sistema.

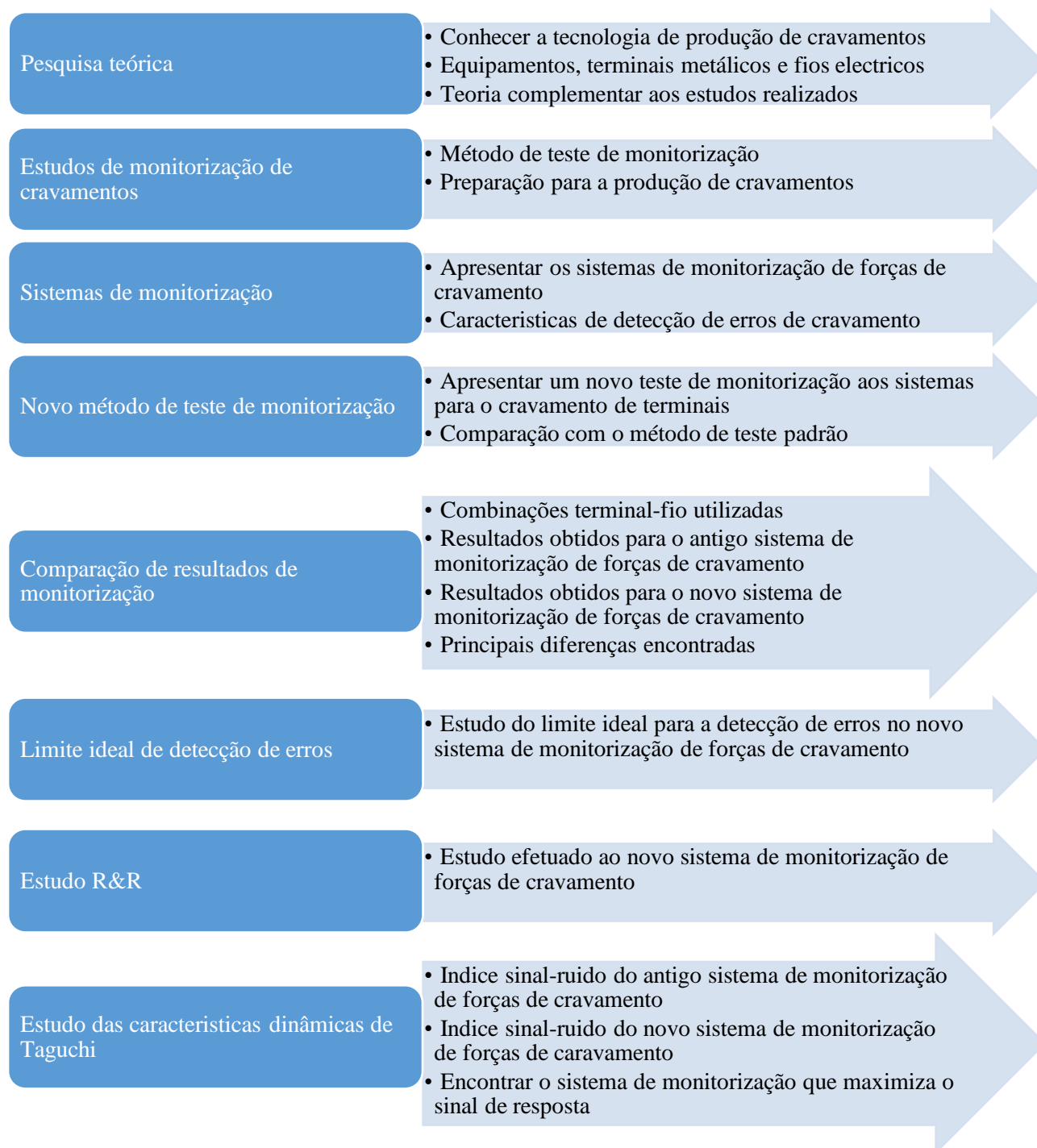
Serão vistas as principais diferenças encontradas nos resultados obtidos após testes de monitorização aos diferentes sistemas de monitorização de cravamentos.

É ainda efetuado um estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R), por forma a perceber a estabilidade do novo sistema de monitorização conforme os seus resultados de monitorização obtidos, e face à sua viabilidade em gerar resultados que possam ser aceites.

Por último, e na ordem de pensamento do ponto anterior, é feito um estudo através do método das características dinâmicas de Taguchi para os resultados dos testes obtidos para ambos os sistemas de monitorização estudados. Com este é possível estudar qual o melhor sistema de monitorização que mesmo quando mudando o seu sinal de entrada consegue assegurar sempre a melhor resposta e a menor variabilidade dos resultados, usando como critério de decisão o índice sinal-ruído resultante da gama de valores obtidos por testes a ambos os sistemas de monitorização.

## 1.3 Metodologia

A metodologia para a realização deste projeto dividiu-se em diversas fases, que organizadas numa sequência previamente definida permitem seguir um estudo com sentido e que consegue cumprir os objetivos apresentados.



## **1.4 Estrutura da dissertação**

A estrutura da dissertação é constituída por diversos capítulos principais, 5 capítulos, por forma a melhor enquadrar o trabalho realizado ao longo do mesmo. No primeiro capítulo é apresentado o trabalho, os objetivos e metodologia usada.

No segundo capítulo, será apresentada a revisão bibliográfica da dissertação e seu enquadramento teórico. Descrevendo a tecnologia do cravamento e seus constituintes, sistemas de monitorização, e teoria auxiliar aos estudos realizados.

No terceiro, é descrita a componente prática da dissertação, apresentado como são realizados todos os testes, estudos e sua metodologia, e como foram estes feitos e o que implicaram. Bem como, a apresentação de funções criadas de forma a auxiliar a interpretação dos resultados dos testes de monitorização.

Num quarto capítulo, são apresentados e analisados os resultados dos testes de monitorização, do novo método de estudo de monitorização e limite de deteção de erros. E por fim apresentados os resultados para os estudos de repetibilidade e reprodutibilidade, e estudo das características dinâmicas de Taguchi.

Finalmente num quinto capítulo, são apresentadas as conclusões que foram possíveis de obter para os estudos realizados, melhorias e algumas sugestões a trabalhos futuros.





## 2. Fundamentos Teóricos

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos enquadrando a temática e os procedimentos do projeto, as tecnologias e equipamentos relacionados ao processo de cravamento, bem com os fundamentos para as metodologias de estudos R&R e características dinâmicas de Taguchi.

### 2.1 Cravamento de terminais

Na indústria automóvel, o cravamento é uma tecnologia constantemente presente e amplamente utilizada. Isto é devido à preocupação com a componente elétrica do veículo automóvel ser cada vez mais relevante, com os automóveis atuais a serem constituídos por dezenas de extensões de cabos e de terminais elétricos, normalmente ligados entre si recorrendo ao cravamento (Zeller, 2014). É considerada como uma das tecnologias de junção mais confiáveis no que diz respeito à conexão de partes metálicas, e um dos mais antigos métodos de realizar esta conexão de forma permanente (Zhmurkin, 2009), substituindo a necessidade de soldadura de terminais (Molex, 2009). Além disso, não necessita de material de adição nem aumento térmico como outros processos do mesmo género, é rápida, fiável e facilmente repetida e resistente (Zeller, 2014).

O cravamento de terminais pode ser descrito como a conexão de um fio a um terminal metálico, executando ao mesmo tempo com este processo um isolamento a qualquer tipo de gás possível de penetrar entre as duas partes (Doyon & Schuetz, 2008). O Processo é do tipo ligação mecânica, cravando dois componentes físicos por ação de deformação a frio (Zeller, 2014).



Figura 2.1 - Terminal cravado

O terminal é a componente mais importante dos dois constituintes. Assim existem um elevado número de diferentes terminais para cravamento no mercado, mas com algo em comum, todos são unidos a um fio por a mesma deformação mecânica chamada de cravamento (Doyon & Schuetz, 2008). Um exemplo de um cravamento pode ser visto na Figura 2.1.

Usar terminais para as conexões elétricas do veículo no lugar de ligações permanentes e fixas possibilita ajustes necessários posteriores no caso de problemas elétricos, ou qualquer tipo de anomalia no automóvel quando em funcionamento ou quando testado, sem ter que toda a secção de onde a anomalia é resultante necessitar ser substituída. Assim, qualquer ligação de cablagem presente na arquitetura do automóvel pode ser feita através de processos irreversíveis, mas quanto às ligações finais entre toda a cablagem e o seu destino final estas não o podem ser, ocorrendo habitualmente por encaixes ou aparafusadas (Zeller, 2014). A substituição é facilitada com esta ação.

O cravamento é conseguido com o auxílio de ferramentas de cravar, e pelas partes modificáveis que as constituem (matrizes, punções, etc.) e que podem ser alteradas consoante o tamanho de secção do fio e do terminal a usar e suas características, sendo cada parte modificável desenhada consoante a combinação terminal-fio, e pela prensa responsável por a aplicação de força e resultante deformação, onde é inserida a ferramenta de cravar personalizável por cada diferente combinação terminal-fio.

A qualidade de um cravamento determina se o sinal elétrico transmitido através de cada um dos fios chega de forma estável ao destino ao longo do tempo (Zeller, 2014).

### **2.1.1 Resistência mecânica e elétrica**

Quando um cravamento é produzido, pretende-se que dois requisitos de qualidade sejam satisfeitos, os requisitos elétrico e mecânico. Estes permitem que seja garantido o bom desempenho em termos de conectividade elétrica sem perda de corrente na ligação estabelecida, e no parâmetro mecânico que tenha força necessária para que a ligação terminal-fio não possa ser facilmente quebrada por movimentos naturais (Nascimento, 2016). A perda de um multifilar, um dos muitos constituintes de um fio na sua na área de secção, pode afetar instantaneamente a circulação de corrente elétrica, bem como uma força aplicada ao cravamento não suficiente ao terminal utilizado pode alterar a sua resistência mecânica. A boa conexão entre fio e terminal é crítica em qualquer acabamento, garantindo a sua integridade mecânica e elétrica para a sua performance requerida à aplicação (Fischer Connectors, 2013).

### 2.1.2 Estripadora de cabo

Os cabos ou fios necessários à produção, previamente cortados à medida recorrendo a uma máquina de corte, devem ser posteriormente removidos de uma parte do seu isolamento. A ferramenta utilizada para fazer esse corte e remoção do isolamento é chamada de estripadora, e o processo pode ser feito de forma automática ou manualmente. O seu objetivo é remover o isolamento, a fim de expor o cobre (fios condutores) e o mesmo ser possível de ser cravado ao terminal metálico, com as dimensões corretas para essa conexão (Nascimento, 2016).



Figura 2.2 - Estripadora de cabo manual

Na Figura 2.2, pode ser vista uma estripadora manual, e a utilizada no decorrer do trabalho. Tanto de forma automática como manual, estas são ajustadas manualmente conforme a especificação e dimensões do cravamento para o tipo de cabo utilizado, ajustando a secção ou diâmetro do cabo, e tamanho do estripado na estripadora. Um comprimento específico de isolamento (PVC) deve de ser removido, enquanto ao mesmo tempo evitando danificar o fio condutor, com um comprimento final dos fios de cobre (multifilares) expostos dependentes do ponto da união do terminal aos fios ou do tipo de cravamento específico a ser processado (Melorose, Perroy, & Careas, 2015). Não ajustando perante as dimensões corretas do cabo, podem por exemplo ser cortados multifilares por parte das lâminas da estripadora reduzindo a condutividade do mesmo.

Por forma a evitar corrosão do cobre exposto, o isolamento cortado pode por vezes não ser totalmente removido após corte evitando exposição aos elementos. A peça de isolamento cortada pode ser chamada de ‘macarrão’.

### 2.1.3 Ferramenta de cravar pneumática (GMD)

A ferramenta de cravar pneumática GMD (Global Mini-Die) é a componente responsável por fazer a deformação do terminal em redor do fio, deformando-o com a especificação correta de forma, força e altura de cravamento. Esta ferramenta é para tal inserida numa prensa que lhe vai transmitir a força necessária a aplicar. Na sua construção existem várias partes ou componentes que a constituem, e que podem ser montados e combinados, as *spare parts*, e como referido anteriormente dependem do tamanho de secção do cabo e do tipo de terminal e suas características. Na Figura 2.3 é vista uma ferramenta de cravar pneumática montada para uma determinada especificação de terminal, e na Figura 2.4 um exemplo de uma seleção de *spare parts*.

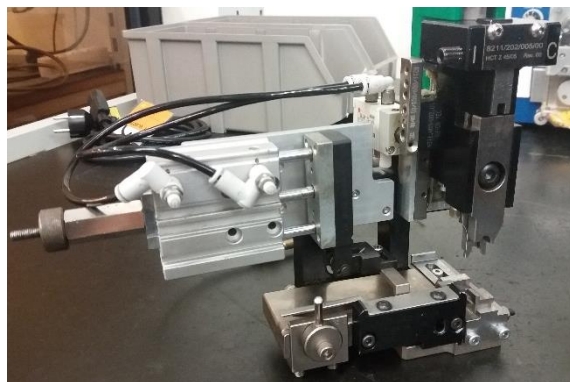


Figura 2.3 - Ferramenta de cravar pneumática (GMD)



Figura 2.4 - Spare Parts

(Fonte: TE Connectivity, 2014)

Existem inúmeras combinações de *spare parts* para inúmeras combinações de terminal-fio. As mesmas são determinadas através de estudos específicos para o efeito na primeira vez que um tipo de terminal entra em produção na organização ou empresa. Assim, os centros de validação técnica definem de acordo com regras padronizadas da empresa, as várias partes que serão montadas na ferramenta de cravar conforme o tipo de terminal a processar (Nascimento, 2016).

Existindo a necessidade de produzir com um terminal previamente estudado, basta a alteração das diversas *spare parts* que foram validadas para esse mesmo terminal específico.

Associados, são para além disso ainda executados vários testes mecânicos e elétricos com fim a garantir que a combinação cabo-terminal para os parâmetros definidos respeita os requisitos mencionados nas normas dos clientes (Nascimento, 2016).

#### 2.1.4 Prensa

A prensa é a componente chave no processo de cravar, uma vez que permite gerar e transferir a força mecânica necessária ao cravamento e deformação do terminal. A força transmitida é na unidade das toneladas, e sem esta o processo seria impossível.

A ferramenta de cravar pneumática referida no ponto anterior, é equipada em um local próprio para o seu encaixe na base da prensa. Podem ser identificados dois tipos de prensas para cravar terminais, manuais e automáticas. Na Figura 2.5 é vista uma prensa de cravamento manual.



Figura 2.5 - Prensa de Cravamento Manual

Na Tabela 2.1 são apresentados os dois tipos de prensa, entendendo-se cravamento individual como um único conjunto de multifilares de cobre num terminal metálico, e por cravamento duplo dois conjuntos de fios de cobre num único terminal metálico (Nascimento, 2016).

Tabela 2.1 - Tipo de prensa para cravamento

(Fonte: Empresa - Relatório Interno, 2009)

Prensa	Funções				
<b>Prensa de cravar automática</b>	Corte de fio	Estripar	Cravamento individual	Cravamento duplo	Isolamento de líquidos
<b>Prensa de cravar manual</b>	-	-	Cravamento individual	Cravamento duplo	Isolamento de líquidos

### 2.1.5 Micrómetro

O micrómetro, visto na Figura 2.6, é utilizado para fazer a verificação dos parâmetros de altura e largura de cravamento, uma vez que estes devem seguir dimensões específicas e estar dentro de tolerâncias. A sua precisão é na ordem dos micrones.

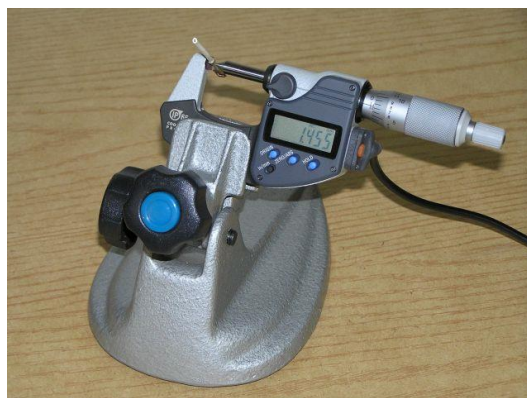


Figura 2.6 - Micrómetro

(Fonte: (WireProcess Specialities, 2013))

A medição é feita no centro do cravamento para uma maior precisão. O micrómetro possui por isso uma superfície em formato lâmina para apoio do terminal cravado, e uma ponta que vai determinar o parâmetro metrológico (Molex, 2009).

### 2.1.6 Terminais

O terminal é a componente metálica onde o conjunto de multifilares de cobre no interior do cabo após estripado é cravado. É constituído por 3 zonas específicas, zona de conexão do

terminal ao seu conector, zona onde são cravados os multifilares de cobre, e zona onde será cravado o isolamento para conferir maior resistência mecânica ao cravamento (Nascimento, 2016).

Distinguem-se dois tipos de terminais, abertos ou *open barrel*, e fechados ou *closed barrel* (Fischer Connectors, 2013), e disponíveis tanto em fitas de terminais como peças individuais. Os termos fechado e aberto resultam do formato do terminal, nos terminais fechados a zona de cravamento é um cilindro completamente fechado enquanto nos abertos eles têm a forma da letra ‘U’ (Doyon & Schuetz, 2008). No presente trabalho são apenas vistos terminais do tipo *open barrel*. Em seguida na Figura 2.7 pode ser visto um exemplo destes em uma fita de terminais.



Figura 2.7 - Fita de terminais metálicos (open barrel)

Do ponto de vista económico, não seria prático se todos os terminais no mercado pudessem só ser acomodados por um único tipo de cabo, com uma única dimensão de estripado e diâmetro de isolamento. Assim, são desenhados para acomodar diversos fios com diferentes dimensões e diâmetros de isolamento dentro de uma determinada gama de forma aceitável (Molex, 2009). Na Figura 2.8 é apresentada a anatomia de um terminal.

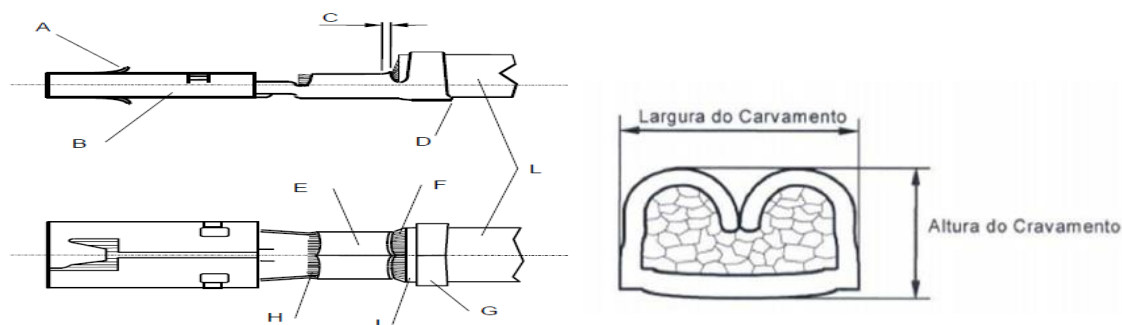


Figura 2.8 - Constituição de um terminal

(Fonte: Empresa - Relatório Interno, 2009)

A - Patilha de fixação  
B - Corpo do Terminal  
C - Gola (*Bellmouth*)  
D - Unha (*Cut-off tab*)  
E - Garras do cobre

F - Janela  
G - Garras do isolamento  
H - Fim do cabo (multifilares)  
I - Fim do isolamento  
L - Cabo

### 2.1.7 Fios ou Cabos multifilares

Antes de começar um processo de cravamento, é importante confirmar que o cabo ou fio a ser utilizado se encontra dentro dos parâmetros do terminal a cravar (JST Connector's, 2005). Os cabos utilizados são do tipo multifilar, ou seja um cabo é constituído por um determinado número de pequenos fios no interior de um material de isolamento, podendo o número de multifilares e tipos de isolamento variar mesmo para cabos com dimensão de secção igual. Em forma de exemplo, um cabo com uma secção de  $1\text{mm}^2$  pode ter no interior do seu isolamento 19 multifilares como poderá ter 32, da mesma forma que a espessura do isolamento poderá variar. Na Figura 2.9 é visto o exemplo de dois tipos de cabos distintos com diferente secção.



Figura 2.9 - Exemplos de cabos

Os multifilares podem ser fabricados a partir de vários materiais tais como cobre, estanho, ou ainda levando um revestimento. Neste trabalho os multifilares apresentados são de cobre e o isolamento em PVC.

Fios com menor número de multifilares são mais utilizados, uma vez que se torna mais dispendioso o fabrico com um maior número individual de multifilares.



## 2.2 Detecção de falhas de cravamento ou não conformidades - Regras

Um cravamento para poder ser considerado como um bom cravamento, ou conforme, deve seguir um conjunto de regras pré-estabelecidas e as mesmas serem monitorizadas e estarem de acordo com o especificado. Durante o processo de cravar são feitos na verdade simultaneamente dois cravamentos, um na zona dos multifilares (garras do cobre) e outro na zona terminal do isolamento (garras do isolamento) (Doyon & Schuetz, 2008). O cravamento de fio, ou multifilares, garante a conexão eletromecânica e compressão eliminando espaços intersticiais e evitando corrosão a longo prazo (Zeller, 2014) (Nascimento, 2016). O cravamento do isolamento atua apenas como aliviador de forças de tração, vibrações ou qualquer tensão sobre o cravamento do fio (Doyon & Schuetz, 2008).

Na realidade, o cravamento de um terminal depende em grande parte de um sistema de diversos fatores importantes ao processo (TE Connectivity, 2014b), estes são:

- 1- Pessoal treinado;
- 2- Qualidade e tipo de fio;
- 3- Qualidade e tipo de terminal;
- 4- Qualidade das ferramentas usadas;
- 5- Documentação, folha de especificação;
- 6- Inspeção do cravamento.

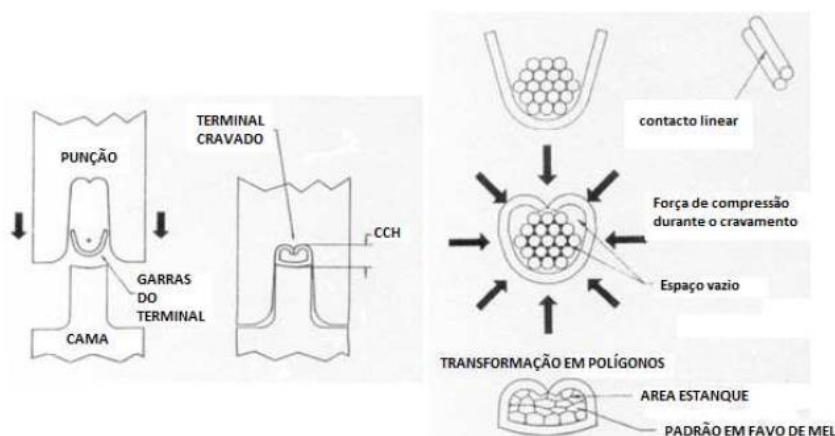


Figura 2.10 - Processo de Cravamento

(Fonte: Zeller, 2014)

Para garantir a especificação após cravamento em cada uma das zonas constituintes do terminal há parâmetros estabelecidos, quer mecânicos quer estéticos tais como as larguras e alturas do terminal que devem ser seguidos. Para além destes, alguns parâmetros só são possíveis

de comprovar fazendo um análise micrográfica ao interior do produto. A Figura 2.10 mostra um esquema do que acontece quando um terminal é cravado na zona das garras do cobre, multifilares.

### 2.2.1 Cravamento de multifilares

Esta zona pode ser também chamada de garras do cobre, uma vez que as garras do terminal nesta secção envolvem e fazem a compressão dos fios de cobre dos cabos utilizados. Não deve existir a falta de multifilares nas garras do cobre, que automaticamente indicará uma falha de cravamento.

Aqui é regra que ambas as garras sejam simetricamente alinhadas após cravamento e que se toquem, comprimindo os multifilares no seu interior de forma a estes passarem de arredondados a um padrão hexagonal fechando margem a qualquer espaço entre eles, que como referido, evitam a corrosão do material. Este padrão só é visível fazendo uma análise micrográfica através de um corte da secção crítica. Na Figura 2.11 é vista uma análise micrográfica de um bom cravamento.



Figura 2.11 - Análise micrográfica na zona das garras do cobre

As garras devem ainda ser centradas com uma diferença entre elas não maior que a espessura do material, e sem tocarem na base do terminal segundo uma tolerância relacionada também com a espessura, como visto na Figura 2.12. O processo de cravamento é um processo em que existe uma variação natural derivada à expansão dos materiais após compressão, posto isto serem definidas tolerâncias de separação entre os bons e maus produtos torna-se adicionalmente necessário (Nascimento, 2016).

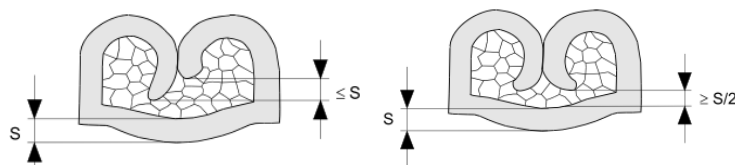


Figura 2.12 – Tolerâncias das regras

(Fonte: Empresa - Relatório Interno, 2009)

Por análise visual verificamos os restantes parâmetros. Deve existir uma gola visível antes da janela do terminal, ausência de excedentes de material e ausência de isolamento no interior das garras do cobre. Este último não só aumenta a resistência elétrica de corrente como baixa a resistência mecânica esmagando o material que perde a sua integridade e quebra. Um parâmetro final indica que os multifilares sejam visíveis para além das garras cravadas nos multifilares de cobre, como visto na Figura 2.8 em H, fim dos multifilares.

### **2.2.2 Cravamento de isolamento**

As garras do isolamento, identicamente às garras do cobre, seguem alguns requisitos garantindo uma estabilidade maior do terminal. Devem se encontrar bem comprimidas junto ao isolamento mas sem nunca o penetrar ou danificar, não permitindo ao isolamento de se movimentar. Em ambos os lados das garras cravadas deve de ser visível o mesmo isolamento.

### **2.2.3 Corpo do terminal**

O corpo do terminal, ou cabeça, é uma zona crítica do terminal uma vez que será responsável por fazer a ligação à caixa de conectores onde os terminais veem o seu destino final. Assim é imperativo que o mesmo não sofra qualquer tipo de deformação durante, antes ou após o processo de cravar. Deve estar alinhado com a ferramenta de cravar sem nunca ultrapassar distorções superiores a 5° de desvio na vertical.

### **2.2.4 Janela**

Entre o fim das garras do cobre e as garras do isolamento situa-se a chamada janela. Através dela conseguimos verificar se existe ou não isolamento para além deste espaço e integrado no cravamento dos multifilares. O normal de ser apresentado é uma proporção de 50% de cada tipo de material no espaço, 50% de cobre (multifilares) e os restantes de isolamento. Na Figura 2.13 é apresentado o esquema de um terminal conforme, e um não conforme para este parâmetro com isolamento nas garras do cobre.

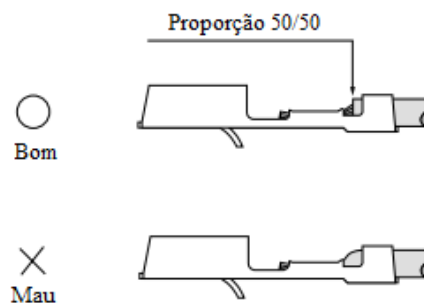


Figura 2.13 - Janela de cravamento conforme e não conforme  
(Fonte: JST Connector's, 2005)

Ignorar qualquer um destes critérios anteriores pode resultar na degradação da qualidade final do cravamento do terminal com o condutor.

Garantindo que todos os parâmetros são alcançados, um cravamento feito assume-se nesse caso como conforme. No entanto para além de apenas a inspeção dos parâmetros visuais e um teste de condutividade esporádico, os cravamentos não são geralmente verificados independentemente quanto à sua qualidade (Cramer, Perey, & Yost, 2007). Assim, para colmatar vem a necessidade da incorporação dos sistemas de monitorização de forças de cravamento.

## 2.3 Sistemas de monitorização de forças de cravamento

Estes sistemas, apesar de naturalmente não verificarem o correspondente à parte visual de um cravamento, conseguem perceber até determinado ponto se mecanicamente estes estão ou não em conformidade com a especificação do terminal utilizado e com o cabo ou fio.

A monitorização evita na verdade que os passos de inspeção e impossíveis de concretizar a olho nu, apenas através de análise micrográfica, sejam necessários de efetuar. Por norma os terminais cravados não são todos verificados pois esse passo inclui que sejam utilizadas técnicas de análise destrutivas como o corte da secção das garras do cobre para análise. Após a inspeção e análise do primeiro cravamento, todos os seguintes são assumidos como conformes e seguindo os parâmetros verificados no terminal analisado, exceto ocorrência de algum erro que necessite fazer uma verificação mais minuciosa e nova análise micrográfica. O sistema de monitorização preenche assim essa necessidade através de uma técnica de análise não destrutiva, utilizando os parâmetros força e tempo necessários ao cravamento.

O sistema de monitorização gera uma curva Força-Tempo para cada cravamento realizado e compara-a com uma curva de referência obtida anteriormente (Zeller, 2014),

chamando a este assim, sistema de monitorização de forças de cravamento. Os parâmetros de força e tempo são registados através de sensores fixos na prensa utilizada. No início de produção, é feita uma aprendizagem no sistema de monitorização para o cravamento que vai ser realizado com o terminal e cabo escolhido, realizando um ou mais cravamentos considerados isentos de erros, resultando num gráfico da curva de força no tempo. Esta será chamada de curva de referência, uma vez que as seguintes curvas de força resultantes de todos os cravamentos serão sobrepostas e comparadas face a esta. Conforme a magnitude dos desvios entre a curva de cravamento atual e a curva de referência, o sistema valida ou não o cravamento atual (Zeller, 2014). Assim, o sistema de monitorização irá verificar automaticamente segundo os padrões registados da curva de referência para um bom cravamento, se vão em encontro desta todos os cravamentos seguintes. Um exemplo destes sistemas de monitorização pode ser visto na Figura 2.14.



Figura 2.14 - Exemplo de Sistema de Monitorização  
(Fonte: Molex, 2013)

Este tipo de sistema é obrigatório quando existem máquinas e prensas para cravamento de terminais, apoiando o operador nos problemas presentes no processo de produção de cravamentos, isolamento nas garras do terminal após cravado ou a falta de multifilares de cobre no seu interior (Nascimento, 2016). Além do mais, permite um avanço significativo no processo para tornar a produção à prova de erro.

Com um sistema de monitorização de forças de cravamento, consegue ser feita a monitorização e obtenção de resultados de cada cravamento individual sem reduzir a velocidade do processo (Komax, 1998).

## **2.4 Capacidade de sistemas de medição**

Os resultados obtidos pelos sistemas de monitorização de forças de cravamento não podem ser considerados completamente exatos. Deve ser tida em conta a incerteza que existe associada ao sistema de medição, e portanto, é necessário que seja avaliado o sistema de medição e a sua capacidade. Essa incerteza pode ser dividida por norma em cinco categorias, exatidão, repetibilidade, reprodutibilidade, estabilidade, e linearidade (Jorge, 2010). Neste caso, o sistema de medição trata-se de um sistema de monitorização de forças.

Na avaliação de um sistema quanto a sua capacidade, esta pode ser avaliada a partir de um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade, também conhecido por estudo R&R.

### **2.4.1 Estudo R&R**

Repetibilidade e Reprodutibilidade são duas componentes de precisão num sistema de medição. A repetibilidade é a variação dentro do sistema de medição, é a variação devida ao equipamento quando utilizado diversas vezes seguidas por um mesmo operador enquanto fazendo varias medições. A reprodutibilidade representa a variação devido a diferenças entre operadores, é a variação entre as médias das medições efetuadas por diferentes operadores utilizando o mesmo equipamento de medição e as mesmas características (Ramesh & Sarma, 2013).

Este estudo irá permitir avaliar a variabilidade associada ao sistema de medição. As fontes de variação que estão associadas a um sistema de medição consistem em, o equipamento utilizado, a experiência do operador e a variação das amostras (Jorge, 2010).

O estudo R&R pode ser efetuado através de três métodos (AIAG, 2010):

1. Método das amplitudes
2. Método da média e amplitude
3. Método da ANOVA

No presente estudo será utilizado e apresentado apenas o método da ANOVA. A análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística que pode ser utilizada para analisar o erro de medição, bem como outras fontes de variabilidade num conjunto de dados (Jorge, 2010), aplicado neste caso ao estudo de um sistema de monitorização de forças.

Mais precisamente, é utilizado o método da ANOVA com cadeias hierárquicas, uma vez que as amostras a ser estudadas são destruídas sempre que experimentadas, chamando assim ao estudo, estudo R&R não replicável. Isto significa que os níveis de um fator serão similares mas não idênticos a diferentes níveis de um outro fator (Ramesh & Sarma, 2013), ou seja, são utilizadas amostras semelhantes mas nunca se pode considerar as mesmas idênticas. Na Figura 2.15 é visto o exemplo de um plano de experiências no formato hierárquico, onde  $C_1$  e  $C_2$  são seguidos de 3 níveis diferentes de amostras. No método normal da ANOVA,  $C_1$  e  $C_2$  seriam seguidos das mesmas 3 amostras cruzando assim os seus dados e existindo a combinação de todos os níveis dos fatores (Anjos, 2004).

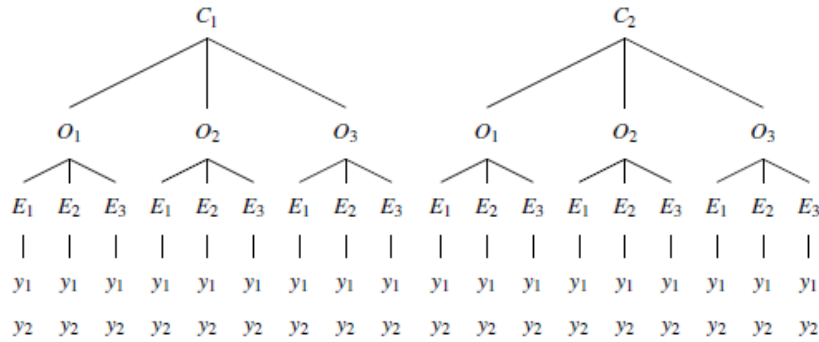


Figura 2.15 – Plano Hierárquico de experiências  
(Fonte: Jorge, 2010)

O modelo estatístico seguinte, descreve a variação do estudo R&R (Anjos, 2004),

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k} \quad \begin{array}{l} i = 1, 2, \dots, a \text{ (operadores)} \\ j = 1, 2, \dots, b \text{ (lotes)} \\ k = 1, 2, \dots, n \text{ (réplicas)} \end{array} \quad (2.1)$$

Onde  $y_{ijk}$  representa a observação da medição  $k$ , relativa à experiência  $j$ , pelo operador  $i$ . Os parâmetros  $\alpha_i$  e  $\beta_{j(i)}$  representam o efeito das experiências do nível do fator operador, e do fator lote hierarquizado ao fator operador respetivamente.  $\varepsilon_{(ij)k}$  representa o erro associado a cada observação.

A tabela da ANOVA resultante pode ser vista na Tabela 2.2, onde SS (*Sum of squares*) representa a soma dos quadrados ou desvios face à média, g.l. os graus de liberdade, e MS (*Mean Square*) os quadrados médios ou variâncias.  $F_0$  representa a estatística de teste.

Tabela 2.2 – Cálculos para ANOVA R&amp;R

Fonte de Variação	SS	g.l.	MS	F <sub>0</sub>
<b>Operador (A)</b>	SS <sub>A</sub>	a-1	MS <sub>A</sub> = SS <sub>A</sub> /(a-1)	MS <sub>A</sub> /MSB <sub>(A)</sub>
<b>Lote hierárquico ao operador (B)</b>	SSB <sub>(A)</sub>	a(b-1)	MSB <sub>(A)</sub> = SSB <sub>(A)</sub> /(a(b-1))	MSB <sub>(A)</sub> /MS <sub>E</sub>
<b>Erro</b>	SS <sub>E</sub>	ab(n-1)	MS <sub>E</sub> = SS <sub>E</sub> /(ab(n-1))	-
<b>Total</b>	SS <sub>T</sub>	abn-1	-	-

São em seguida apresentadas as fórmulas para os cálculos do preenchimento da tabela ANOVA R&R (SEMATECH, 1995). A Soma dos quadrados do operador, SS<sub>A</sub> é dada por,

$$SS_A = bn \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{...})^2 \quad (2.2)$$

Para a soma dos quadrados do lote hierarquizado ao operador, SS<sub>B(A)</sub> vem,

$$SS_{B(A)} = n \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b (\bar{Y}_{ij.} - \bar{Y}_{i..})^2 \quad (2.3)$$

A soma dos quadrados do erro, SS<sub>E</sub> pode ser obtida pela equação,

$$SS_E = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{Y}_{ij.})^2 \quad (2.4)$$

Para a soma dos quadrados totais, SS<sub>T</sub> a seguinte equação é apresentada,

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n (y_{ijk} - \bar{Y}_{...})^2 \quad (2.5)$$

Com,

$y_{ijk}$  = observação da medição  $k$ , relativa à experiência  $j$ , pelo operador  $i$

$\bar{Y}_{ij.}$  = média de  $n$  réplicas no lote  $j$  pelo operador  $i$



$\bar{Y}_{i..} = \text{média de } b \times n \text{ medidas pelo operador } i$

$\bar{Y}_{...} = \text{média de todos os valores retirados na experiência}$

Os cálculos para o estudo R&R utilizam os seguintes métodos para a estimação da variância das fontes de variação (Ramesh & Sarma, 2013). Para a variação no equipamento (VE) também chamada de **repetibilidade** (erro associado ao equipamento),

$$VE = \sqrt{MS_E} \quad (2.6)$$

A variação no operador (VO), conhecida também pela **reprodutibilidade** (erro associado ao operador), pode ser dada pela equação,

$$VO = \sqrt{\frac{MS_A - MSB_{(A)}}{bn}} \quad (2.7)$$

A **variação total** é calculada pelo seguinte,

$$VT = \sqrt{VP^2 + R\&R^2} \quad (2.8)$$

Onde, a variância dos lotes hierarquizados ao operador (VP) ou peças vem de,

$$VP = \sqrt{\frac{MSB_{(A)} - MS_E}{n}} \quad (2.9)$$

E, a variância devida a variação que ocorre no sistema de medição (R&R),

$$R\&R = \sqrt{VE^2 + VO^2} \quad (2.10)$$

O somatório da variação total pode ser visto pelo representado na Figura 2.16 (McNeese, 2012).

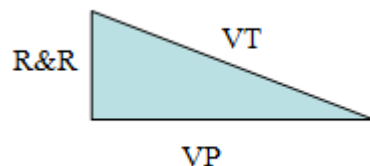


Figura 2.16 – Representação das componentes de variação num sistema de medição

(Fonte: adaptado de McNeese, 2012)

O triângulo visto na Figura 2.16 mostra facilmente o que acontece quando as variâncias numa peça e no sistema de medição se alteram. Se a variação das peças for superior à variação do sistema de medição, esta terá maior impacto na variação total. No entanto, se a variação do sistema de medição se tornar muito grande, começará esta a ter o maior impacto.

## 2.5 Métodos de Taguchi com Características Dinâmicas

Os métodos de Taguchi seguem uma metodologia baseada no desenho de experiências, tendo como objetivo final a redução da variabilidade de um processo ou produto. Essa redução atinge-se quando os melhores níveis dos fatores controláveis são encontrados, resultando num processo mais robusto (Jorge, 2010).

A análise por métodos de Taguchi depende em grande parte da característica da qualidade que se encontra em estudo, que podem ser do tipo Menor-é-melhor, Nominal-é-melhor e Maior-é-melhor (Melo, 2014). A característica da qualidade pode ser dinâmica e ainda estática, da qual a estática não entrará no âmbito deste trabalho.

Com o método estático tem-se a capacidade de determinar o conjunto de parâmetros para um resultado específico. Mas utilizando o método das características dinâmicas é-nos permitido determinar os valores ótimos para obter não um mas o conjunto completo de resultados desejados (Melo, 2014). As características dinâmicas são as características da qualidade de um sistema que variam de forma dinâmica quando é alterado o sinal de entrada (Jorge, 2010).

Os dados são analisados através da razão sinal-ruído. Os métodos de Taguchi têm então como principal objetivo maximizar um sinal de saída e diminuir o ruído, de tal forma que a razão sinal-ruído seja sempre o maior possível. E por norma é tentado chegar aos níveis dos fatores controláveis que mais reduzem a variação do processo e aumentam a razão sinal-ruído, ou S/N. Em alguns processos pode não se conseguir chegar aos níveis dos fatores que de melhor forma

diminuem a variação do processo, mas decidir apenas pela razão S/N, de entre dois sistemas, qual aquele que de melhor forma maximiza o sinal face ao ruído do processo.

Para um sistema onde cada sinal tem uma diferente resposta, e se relacionam os parâmetros de entrada com os resultados de saída, a característica da qualidade é a relação entre  $y$  e o fator de sinal  $M$ , que pode ser definido pela seguinte expressão (Jorge, 2010; Melo, 2014),

$$y = \beta(M) \quad (2.11)$$

$M$  representa o sinal de entrada,  $y$  é a resposta correspondente, e  $\beta$  o declive da reta da resposta.

Para as características dinâmicas, os resultados obtidos através da equação permitem analisar o impacto dos fatores na relação sinal e resposta, nomeadamente para três critérios,

1. Sensibilidade
2. Linearidade
3. Variabilidade

A sensibilidade, reflete-se no declive da reta sinal-resposta. Quanto maior o declive  $\beta$ , maior a sensibilidade, e melhores são os fatores que contribuam para o maior declive (Jorge, 2010). O ideal é que exista o maior declive possível, e como tal maior sensibilidade (Melo, 2014).

A linearidade avalia a proporcionalidade da resposta com o sinal de entrada. Uma maior linearidade permite um mais fácil ajuste do sinal de entrada para as respostas desejadas (Melo, 2014).

A variabilidade da resposta com características dinâmicas tem em conta a variabilidade ao longo de toda a reta da resposta. Assim devem ser tidos em conta fatores que produzam os resultados mais próximos do esperado para um determinado sinal de entrada, mas que produzam também esses resultados para os demais sinais de entrada (Jorge, 2010).

A razão sinal-ruído depende da relação que existe entre o sinal de entrada e a resposta, e pode ser determinada de várias formas diferentes. Essas são, através da equação proporcional no ponto zero, equação proporcional num ponto de referência, e equação linear.

A equação proporcional no ponto zero, é utilizada quando a relação existente é de maneira que a reta da resposta passe na origem. A equação proporcional num ponto de referência, quando

é sabido que a relação entre o sinal de entrada e resposta não passa pela origem. E a equação linear utilizada de uma forma geral onde as duas equações anteriores não podem ser aplicadas. Neste trabalho será apresentada e aplicada a equação linear.

Assim, a equação linear para a relação sinal de entrada e resposta para as características dinâmicas é dada por a equação seguinte (Melo, 2014),

$$y = m + \beta(M - \bar{M}) + \varepsilon \quad (2.12)$$

Onde  $\bar{M}$  representa a média do sinal de entrada, e  $m$  a média dos dados, dadas respetivamente por as equações seguintes,

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i}{k} \quad (2.13)$$

$$\hat{m} = \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} y_{ij}}{kr_0} = \frac{\sum_{i=1}^k y_i}{kr_0} \quad (2.14)$$

Onde,

- $i = 1, \dots, k$ , sendo  $k$  o número de níveis do fator sinal
- $j = 1, \dots, r_0$ , para  $r_0$  igual ao número de observações para cada nível do fator sinal
- $\varepsilon$ , representa o ruído branco

O cálculo do declive da reta  $\beta$  utiliza a equação,

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) y_i}{r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2} = \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) y_i \right) \quad (2.15)$$

Onde,

$$r = r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2 \quad (2.16)$$

E,

$$y_i = \sum_{j=1}^{r_0} y_{ij} \quad (2.17)$$

O cálculo do índice sinal-ruído (S/N) faz uso de um determinado número de equações, vistas agora em seguida.

A soma total dos quadrados usa a seguinte expressão,

$$S_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{ij})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k y_i)^2}{kr_0} \quad (2.18)$$

A variação causada pelo efeito linear de  $\beta$  é calculada por,

$$S_\beta = \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^k (y_i (M_i - \bar{M})) \right)^2 \quad (2.19)$$

Para a soma dos quadrados do erro tem-se que,

$$S_e = S_T - S_\beta \quad (2.20)$$

A variância do erro é dada por,

$$V_e = \frac{1}{kr_0 - 2} S_e = \frac{S_e}{v_e} \quad (2.21)$$

Por fim para a determinação do índice S/N temos,

$$(S/N) = 10 \log \frac{\frac{1}{r}(S_\beta - V_e)}{V_e} = 10 \log(\eta) \quad (2.22)$$

A partir do qual nos é dado o valor resultante para a razão entre o sinal e o ruído.

### 3. Metodologias de Investigação

Neste capítulo apresentam-se os métodos de estudo e de teste utilizados para realizar e recolher os dados do estudo aos sistemas de monitorização de forças de cravamento, e os componentes fio e terminais utilizados nos mesmos, bem como os sistemas de monitorização estudados, passando a ser apresentado um novo método de teste de monitorização e o que este implica modificar.

Em seguida, apresenta-se o método pelo qual foi possível chegar ao valor do limite ideal de deteção para o erro de cravamento no novo sistema de monitorização estudado. Por fim, apresentam-se as condições em que o estudo R&R foi realizado e com que combinação fio e terminal, e condições do estudo de características dinâmicas por o método de Taguchi.

#### 3.1 Método de Estudo ou Teste de monitorização

Pretendia-se era fazer o estudo de dois sistemas de monitorização de qualidade no cravamento, e por isso realizar testes com os mesmos para a comparação e análise dos dados resultantes. Assim, antes dos sistemas de monitorização de forças de cravamento serem apresentados é necessário falar sobre os testes feitos aos mesmos e como são realizados, por forma a poder ser feita a crítica a cada sistema e *software* dos mesmos posteriormente. Estes testes de monitorização são realizados segundo um método de teste que foi previamente definido e sequenciado, e é padrão na empresa, e realizado sempre da mesma forma em ambos os sistemas de monitorização que serão apresentados posteriormente. Assim, o teste realizado, também chamado de estudo de monitorização, é feito na seguinte sequência:

1. 100 Terminais cravados considerados bons
2. 1 Terminal cravado em vazio (sem a componente de fio elétrico)
3. 15 Terminais cravados com 1 multifilar em falta no fio elétrico utilizado
4. 15 Terminais cravados com 2 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
5. 15 Terminais cravados com 3 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
6. 15 Terminais cravados com 4 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
7. 15 Terminais cravados com 25% de isolamento dentro das garras do cobre do terminal
8. 15 Terminais cravados com 50% de isolamento dentro das garras do cobre do terminal

Os dados resultantes são individualmente recolhidos por cada cravamento efetuado e obtidos por meio dos sistemas de monitorização de forças de cravamento, a ser apresentados no ponto 3.2 e explicados no mesmo.

Os resultados dos testes são então compilados em listas de valores e analisados estatisticamente com a ajuda de um *template* previamente preparado e facilitando assim o processo. Este *template*, por razões confidenciais é apenas falado superficialmente, salvo modificações e novas funções incluídas no mesmo no decorrer do trabalho realizado. Através destas listas de resultados são obtidas as médias e desvios padrão dos valores, e por sua vez, curvas da distribuição normal podem ser criadas graficamente.

### 3.1.2 Preparação do Cravamento e Ferramenta de Cravamento

Antes de iniciar um teste, e proceder à produção de cravamentos com um determinado fio de uma secção específica e um diferente terminal adequado a essa mesma secção e fio, é necessário primeiro identificar e montar as ferramentas certas para um cravamento correto. Nesta fase, existem as chamadas folhas de validação, que constam numa base de dados e que sempre que necessária a produção são consultadas. Nestas vem especificado, tendo como principal identificador o terminal usado, alturas e larguras de cravamento nas zonas das garras do cobre e garras do isolamento bem com as suas tolerâncias. Tipos de fio a utilizar e suas secções, todas as *spare parts* (punções, mesas, etc.) necessárias a ser montadas na ferramenta de cravar, informações sobre o próprio terminal como exemplo a sua constituição, bem como terminais equivalentes que podem ser utilizados como substitutos. Na Figura 3.1 apresenta-se o esquema de uma ferramenta de cravar preparada para um determinado terminal metálico, e como as várias *spare parts* se ‘encaixam’ entre si sobrepondo-se verticalmente e fazendo a deformação do terminal.

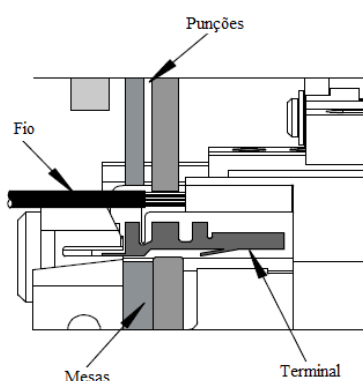


Figura 3.1 – Esquema de um corte transversal da ferramenta de cravar pneumática, zona de cravamento  
(Fonte: adaptado de Molex, 2009)



É necessário ainda que tudo esteja alinhado e ajustado para o cravamento em conformidade e sem problemas durante produção. De uma forma geral a preparação para o início de produção é feita da seguinte forma (Molex, 2009):

1. Verificar a condição das ferramentas (sujeidade, degradação).
2. Desligar a prensa, e retirar guardas de proteção.
3. Instalar a ferramenta de cravamento pneumática com as partes apropriadas.
4. Inserir fita de terminais, localizando o primeiro terminal sobre a *mesa*.
5. Fazer um ciclo da prensa manualmente, verificando a não existência de interferências.
6. Então, verificar o alinhamento dos punções com a *mesa* (Figura 3.1)
7. Verificar se após um ciclo o avanço de um novo terminal é feito novamente e corretamente para o centro da *mesa* e bem posicionado.
8. Ligar a prensa e repor guardas.
9. Cravar um terminal vazio.
10. Verificar as especificações do cravamento, unha e gola, e se as garras fecham corretamente e simetricamente.
11. Cravar um terminal com o fio a ser utilizado.
12. Avaliar as especificações de posição de isolamento.
13. Ajustar altura do cravamento para as garras do cobre na ferramenta de cravamento pneumática até esta coincidir com a altura especificada na folha de validação, fazendo vários cravamentos para tal.
14. Realizar o passo anterior para as garras do isolamento.

O início da produção de cravamentos pode agora ser iniciado. Na Figura 3.2 é apresentada o esquema de uma sequência resultante de um cravamento após feito todo o *setup*, e o que deverá acontecer durante a deformação por aplicação de força no terminal.



Figura 3.2 - Sequência de um cravamento em conformidade  
(Fonte: TE Connectivity, 2016)

Para uma certeza adicional na validação, realiza-se um cravamento e faz-se um corte da secção do mesmo, verificando através de análise micrográfica a conformidade dos fios no interior do cravamento, bem compactados e sem espaços vazios.

Um passo adicional será feito aquando da utilização de um sistema de monitorização, nomeadamente a aprendizagem do sistema, com fim à criação da curva de referência de força do cravamento.

### **3.2 Sistemas de monitorização de forças de cravamento estudados**

Neste trabalho são estudados dois sistemas de monitorização de forças de cravamento, um sistema antigo e um novo sistema, do qual se pretende tirar conclusões face à sua predominância sobre o sistema de monitorização antigo e atualmente em uso na produção em fábrica. Ambos têm a mesma função quando instalados e permitem analisar dados de forma idêntica.

Os sistemas de monitorização serão chamados de A e B. O Sistema de monitorização A trata do antigo sistema utilizado em fábrica e desatualizado, e o Sistema de monitorização B do novo sistema mais moderno e atualizado para as exigências atuais, e também o que se encontra efetivamente em estudo no âmbito deste trabalho.

Aqui, e antes de começar um estudo propriamente, é feita uma análise crítica a ambos os sistemas de monitorização, ou seja, ver como os mesmos funcionam e como são construídos, a facilidade de funcionamento com os mesmos, o *software* de cada equipamento e seus erros, características vantajosas face ao sistema oposto, etc.

Ambos os sistemas se apresentam de formas idênticas através de um interface que permite interação, e ligados à prensa por meio de sensores que fazem a leitura de tempos e forças criando a curva de forças de cravamento.

#### **3.3.2 Sistema de monitorização de forças A**

O sistema de monitorização de forças A é apresentado como visto na Figura 3.3, onde à direita está o exemplo de uma curva resultante de um cravamento no sistema. E tal como já referido anteriormente, e da mesma forma para o sistema de monitorização B é responsável por criar uma curva padrão de referência e por gerar curvas de força-tempo sucessivamente para cada cravamento seguinte e compara-las com a de referência. Esta curva de referência é feita sempre

que se inicia um novo estudo ou produção de cravamentos, pois será sempre diferente para diferentes combinações terminal-fio.



Figura 3.3 - Sistema de monitorização de forças A

A curva de referência é gerada realizando um número de cravamentos, por norma um mínimo de 3, considerados como padrão, ou seja cravamentos efetuados em ambiente laboratorial para os quais não se considera haver erros ou não conformidades (Zeller, 2014). Este, como referido, é o passo final antes de iniciar um teste de monitorização ou estudo do sistema de monitorização.

Na Figura 3.4 é visto um exemplo de uma curva de referência, a sua estrutura e como é vista em relação a uma curva atual de cravamento. O sistema de monitorização A faz automaticamente a divisão da curva de referência em 4 zonas distintas, como assinalado através das curvas verticais no gráfico marcando o início de cada zona. As 3 primeiras zonas (Z1 a Z3) são usadas para avaliação e cálculos. A zona 4 é usada para cálculos internos de escala do gráfico (Circuitmaster Designs, 2010). A zona 3 é definida começando aos 90% da força máxima da curva de referência ou pico de força (PF).

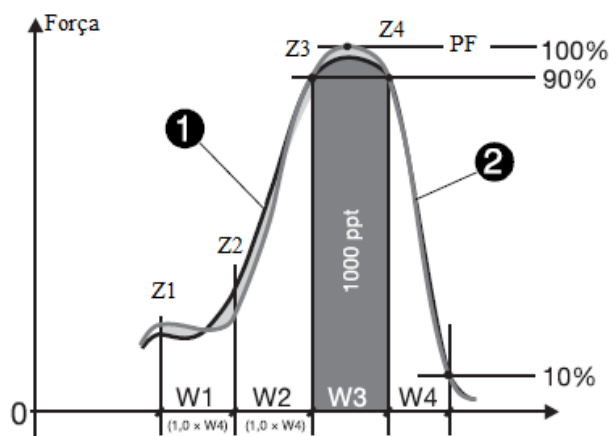


Figura 3.4 - Curva de referência vs. Curva de cravamento.

1- Curva de cravamento; 2- Curva de referência

(Fonte: adaptado de Komax, 1998)

A área contida na zona 3 é então calculada e dividida de maneira a esta ser constituída por 1000 pontos (Zeller, 2014), um ponto será neste caso um milésimo da área. Todos os desvios da curva de referência em relação à curva de cravamento atual serão então avaliados em relação a esta área da zona 3 da curva de referência (Komax, 1998), a partir desta área de 1000 pontos.

Sempre que é feito um novo cravamento e gerada uma nova curva de força-tempo, o sistema volta a dividir também a nova curva nas diferentes zonas e calcula a diferença de área entre esta e a de referência, fazendo a relação com os 1000 pontos. É esta diferença a responsável por decidir se o cravamento ‘passa ou não passa’, ou seja, se este é um bom cravamento e conforme. E para isso é necessário definir um valor limite que esses desvios podem alcançar.

Neste trabalho o limite máximo que o desvio total de uma curva de cravamento poderá ter é de **70 pontos** face à de referência. No entanto, para cada uma das zonas da curva são adicionalmente definidos limites individuais, calculados automaticamente pelo sistema de monitorização e visualizados no sistema. Isto significa que o desvio total entre as duas curvas de cravamento, atual e de referência, não poderá exceder os 70 pontos. Mas acontecendo qualquer uma das diferentes zonas exceder o limite definido individualmente para a mesma, o sistema irá declarar o cravamento como não conforme apesar de a diferença de área apenas na zona em questão poder não exceder os 70 pontos definidos.

As unidades usadas no sistema de monitorização A são definidas por **R**.

### **3.3.3 Sistema de monitorização de forças B**

O sistema de monitorização de forças B, como visto na Figura 3.5, é o sistema de monitorização efetivamente em estudo. Na mesma figura, à direita apresenta-se o exemplo de uma curva de cravamento dada pelo sistema. Como referido anteriormente, tem as mesmas funções que o sistema de monitorização de forças A, criando curvas de força-tempo por cada cravamento efetuado e comparando com uma curva de forças de referência gerada. Esta é também gerada sempre que se inicia uma nova produção de uma combinação terminal-fio, e com a mesma metodologia e mais uma vez o último passo antes de iniciar um teste de monitorização. Este sistema em relação ao anterior permite a recolha de dados facilmente por uma *pen usb* ou ligação em rede a um computador, e ainda inserir comentários a cravamentos diretamente no sistema.



Figura 3.5 - Sistema de monitorização de forças B

Na Figura 3.6 é apresentado para o sistema de monitorização B uma curva de forças de um cravamento face à curva de referência de forças gerada. Da mesma forma são definidas para este sistema zonas para as curvas de cravamento e de referência, definidas no sistema. A zona vista no interior da caixa delineada a azul é região da curva que é efetivamente analisada para o erro. O sistema patenteado de análise cumulativa de desvios (CDA) do sistema de monitorização B faz automaticamente o cálculo do desvio das curvas de cravamento em relação à de referência, e apresenta o resultado total do desvio.

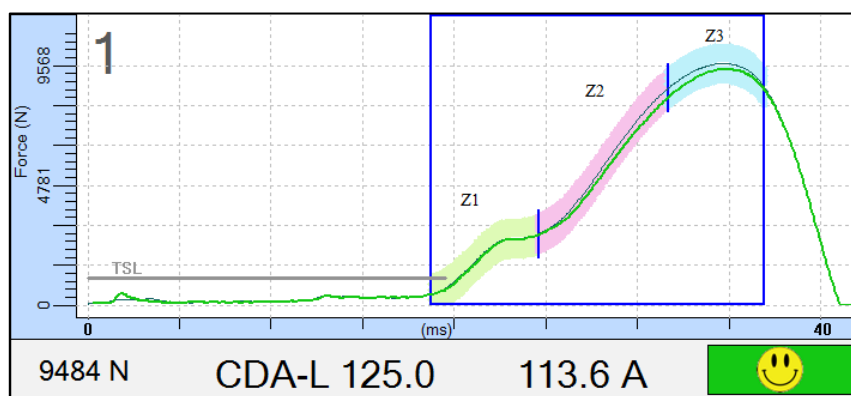


Figura 3.6 - Curva de referência vs. Curva de cravamento.

Verde – Curva de cravamento; Preto – Curva de referência

Como para o sistema de monitorização A, é necessário também definir um máximo desvio para o qual um cravamento pode ser considerado conforme. Para este sistema de monitorização, é usado um limite máximo de **125** para o qual a diferença entre uma curva de cravamento e a de referência pode alcançar antes de haver a indicação de uma não conformidade por parte do sistema. Não existe para este sistema definidos limites individuais por cada zona analisada e valores resultantes para os mesmos, apenas o desvio total resultante.

As unidades usadas no sistema de monitorização B são definidas por A.

### 3.3.4 Características de deteção de cravamentos não conformes por zonas

Em cada zona da curva de forças, quer para o sistema de monitorização A quer para o B, desvios anormais podem ser característica de um tipo de erro previamente conhecido. Um desvio anormal na zona 1 de uma curva indica por norma que existe isolamento do fio dentro das garras do terminal. Na zona 3 desvios anormais indicam a falta de multifilares do fio no interior do cravamento. Na Tabela 3.1 pode ser visto em maior detalhe em que zonas da curva de forças são por norma detetados erros por falta de multifilares ou isolamento nas garras do terminal cravado. É importante referir que este padrão de deteção de erros é o esperado que venha a acontecer, no entanto podem por vezes haver erros detetados nas diversas zonas, nomeadamente erros que deveriam ser detetados apenas em outra zona da curva de força.

Tabela 3.1 - Deteção padrão esperada na monitorização

Zonas	Tipo de erro detetado	
	Falta Multifilares	Isolamento
Zona 1	Não	Sim
Zona 2	Sim	Sim
Zona 3	Sim	Não
Desvio total	Sim	Sim

Na zona 1, desvios de erro para além dos limites não são detetados para erros do tipo falta de multifilares para ambos os sistemas de monitorização de forças, apenas o são nas zonas 2 e 3. No entanto, erros do tipo isolamento dentro das garras do cravamento já são detetados na zona 1 e 2, e normalmente não o são na zona 3.

### 3.3 Estudo de um novo método de teste aos sistemas de monitorização

Este estudo tem como motivo principal a redução de desperdício, quer em tempo quer em material, passando para metade o número de cravamentos realizados. Se se verificar não existir diferenças significativas entre o método padrão e o novo método de estudo para os seus resultados, o material utilizado (fios e terminas metálicos) poderá ser reduzido em 50%, bem como o tempo despendido ao efetuar um estudo de monitorização segundo a nova metodologia. Teoricamente,

passaríamos de 191 cravamentos realizados para 93. Como sequenciado anteriormente, mas com toda a gama de valores reduzida para metade (50%), o teste seguirá da seguinte forma:

1. 50 Terminais cravados considerados bons realizados
2. 1 Terminal cravado em vazio (sem a componente de fio elétrico)
3. 7 Terminais cravados com 1 multifilar em falta no fio elétrico utilizado
4. 7 Terminais cravados com 2 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
5. 7 Terminais cravados com 3 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
6. 7 Terminais cravados com 4 multifilares em falta no fio elétrico utilizado
7. 7 Terminais cravados com 25% de isolamento dentro das garras do cobre do terminal
8. 7 Terminais cravados com 50% de isolamento dentro das garras do cobre do terminal

São feitos testes em ambos os sistemas de monitorização de forças, A e B, e por os dois métodos de estudo de sistemas de monitorização, o padrão e o novo método. Dois tipos de combinação terminal-fio, com secções de fio iguais a  $1\text{mm}^2$  e  $0,35\text{mm}^2$  são utilizados em cada método de estudo.

Após o estudo realizado e compilados os dados, são calculadas as médias e desvios padrão dos resultados para os cravamentos conformes e não conformes resultantes dos estudos ao sistema de monitorização A e B. A metodologia utilizada para perceber se de facto a diferença é significativa entre o método padrão e o novo método, é feita com o uso do teste estatístico de hipóteses à diferença de duas médias. Sendo ambos os desvios padrão do processo,  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$ , desconhecidos (Pereira & Requeijo, 2012).

As hipóteses testadas são dadas por,

$$\begin{aligned} H_0: \mu_1 - \mu_2 &= \Delta_0 \\ H_1: \mu_1 - \mu_2 &\neq \Delta_0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

São recolhidas duas amostras com dimensões  $n_1$  e  $n_2$  por cada teste de hipóteses realizado à diferença das médias, correspondendo sempre uma amostra por cada tipo de teste de monitorização, método padrão e o novo método. No total são feitos 14 testes de hipóteses à diferença de médias do método padrão face ao novo método por cada sistema de monitorização de forças, 7 por cada combinação de terminal-fio. Ou seja, 1 teste à diferença de médias dos cravamentos considerados conformes, e um por cada tipo de erro estudado, falta de multifilares e inclusão de isolamento nas garras do terminal cravado. Na Tabela 3.2 são vistas todas as dimensões das amostras recolhidas por cada sistema de monitorização de forças e combinação de

terminal-fio, e na Tabela 3.3 as combinações terminal-fio estudadas. O tipo de terminal é neste trabalho sempre identificado por um código.

Tabela 3.2 - Dimensão das amostras recolhidas

	Cravamentos Conformes	Falta de multifilares				Isolamento nas garras do terminal	
		-1	-2	-3	-4	25%	50%
<b>Método padrão (n<sub>1</sub>)</b>	100	15	15	15	15	15	15
<b>Novo método (n<sub>2</sub>)</b>	50	7	7	7	7	7	7

Tabela 3.3 - Combinações Terminal-Fio estudadas para o novo método de testes

Terminal	Secção do Fio	Nº de multifilares
10864929	1 mm <sup>2</sup>	32
15432208	0,35 mm <sup>2</sup>	7

As populações de dados têm médias e variâncias desconhecidas. Assim o teste dependerá das duas variâncias das amostras recolhidas serem diferentes ou não. Desta forma é essencial conduzir um teste de comparação entre as variâncias antes de testar as médias. Para um  $\alpha=5\%$ , as hipóteses a testar são (Pereira & Requeijo, 2012),

$$\begin{aligned} H_0: \sigma_1^2 &= \sigma_2^2 \\ H_1: \sigma_1^2 &\neq \sigma_2^2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

A estatística de teste é definida por,

$$F_0 = \frac{S_1^2}{S_2^2} \quad (3.3)$$

E a hipótese nula é rejeitada quando,

$$F_0 > F_{\alpha/2; (n_1 - 1)(n_2 - 1)} \text{ ou } F_0 < F_{(1-\frac{\alpha}{2}); (n_1 - 1)(n_2 - 1)} \quad (3.4)$$

Confirmando as duas variâncias como **não significativamente diferentes**, é calculada em primeiro lugar a variância combinada das duas amostras com,



$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \Leftrightarrow S_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (3.5)$$

Para o teste estatístico definido em 3.1,

$$t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = \frac{(X_1 - X_2) - \Delta_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (3.6)$$

A hipótese nula é rejeitada quando,

$$|t_0| > t_{\alpha/2; (n_1 + n_2 - 2)} \quad (3.7)$$

No entanto, acontecendo as duas variâncias serem **significativamente diferentes**, a estatística de teste será nesse caso dada por,

$$t_0 = \frac{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2) - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} = \frac{(X_1 - X_2) - \Delta_0}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (3.8)$$

A hipótese nula é rejeitada quando,

$$|t_0| > t_{\alpha/2; \nu} \quad (3.9)$$

Com  $\nu$  igual a,

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (3.10)$$

Os dados aqui obtidos e utilizados para o cálculo do teste às diferenças significativas ou não significativas entre as médias dos dois métodos de estudo, padrão e novo método, serão também utilizados quando feito o estudo comparativo aos resultados obtidos para os dois sistemas de monitorização de forças de cravamento no ponto 3.4.

Em adição a estes serão também obtidos dados para outras combinações de terminal-fio em ambos os sistemas. Neste ponto foram vistas apenas duas combinações de terminal-fio, e caso o estudo confirme não existirem diferenças significativas serão utilizados apenas dados obtidos por utilização do novo método de estudo nos pontos seguintes e estudos.

### **3.4 Estudo comparativo dos sistemas de monitorização de forças de cravamento**

O estudo mais importante realizado é o estudo comparativo dos sistemas de monitorização de forças de cravamento, porque é este que permite chegar à conclusão de qual o melhor sistema e se o sistema de monitorização B é de facto superior ao antigo sistema utilizado. Os testes ou estudos de monitorização feitos seguem a metodologia apresentada nos pontos 3.1 e 3.3.

Os resultados dos testes de monitorização apresentados podem ser analisados em relação à diferença de erro entre uma curva de referência e uma curva de cravamento atual para cada uma das zonas da curva de força de cravamento resultante, para os totais dos erros entre as duas curvas, e ainda para as forças máximas no pico das curvas de cravamento.

É importante mencionar que, não se podem comparar os valores dos dados obtidos de um teste de monitorização a um sistema com os dados obtidos pelo outro sistema, por utilizarem escalas diferentes e serem realizados em momentos diferentes. No entanto, pode-se sim comparar se existe a deteção ou não de erros de cravamentos não conformes de igual forma para ambos os sistemas de monitorização de forças nos vários tipos de erro ensaiados. E através das curvas da normal criadas para todos os conjuntos de dados resultantes dos testes de monitorização às combinações terminal-fio realizados em cada um dos sistemas, obter estatísticas das probabilidades de cada sistema em não detetar os diversos tipos de erro ensaiados. As curvas da Normal são criadas para os resultados dos desvios nas diversas zonas no sistema de monitorização A e para o seu total, e no sistema de monitorização B apenas para o total dos desvios das curvas. Pode-se ainda verificar graficamente, através das curvas da Normal, quão distantes as curvas da Normal resultantes dos dados obtidos para o teste aos tipos de erro de cravamento se encontram da curva da Normal dos cravamentos considerados como bons. Na Tabela 3.4 estão indicadas as

combinações de terminal-fio para as quais foram feitos testes de monitorização aos sistemas de monitorização de forças A e B.

Tabela 3.4 - Combinações Terminal-Fio estudadas para os sistemas de monitorização

Terminal	Secção do Fio	Nº de multifilares
10756805	0,13 mm <sup>2</sup>	14
15432208	0,35 mm <sup>2</sup>	7
10864929	0,50 mm <sup>2</sup>	19
10864929	1 mm <sup>2</sup>	32

No exemplo visto na Figura 3.7, é visto o gráfico resultante de um teste de monitorização para uma combinação específica terminal-fio, onde no eixo das abcissas se encontram os valores das médias dos dados retirados e no eixo das ordenadas a densidade de probabilidade. Graficamente serão sempre visíveis as curvas da Normal para o conjunto de dados dos bons cravamentos, e uma curva por cada tipo de erro testado. Para os tipos de erro resultantes da falta de multifilares, estes são apresentados na legenda em formato de percentagem de material em falta, ou seja a percentagem retirada do número de multifilares total do fio utilizado. Por norma, um fio cravado de onde foi retirado cerca de 10% do material já é esperado por parte de um sistema de monitorização que o consiga identificar como defeituoso e resultar num sinal de erro.

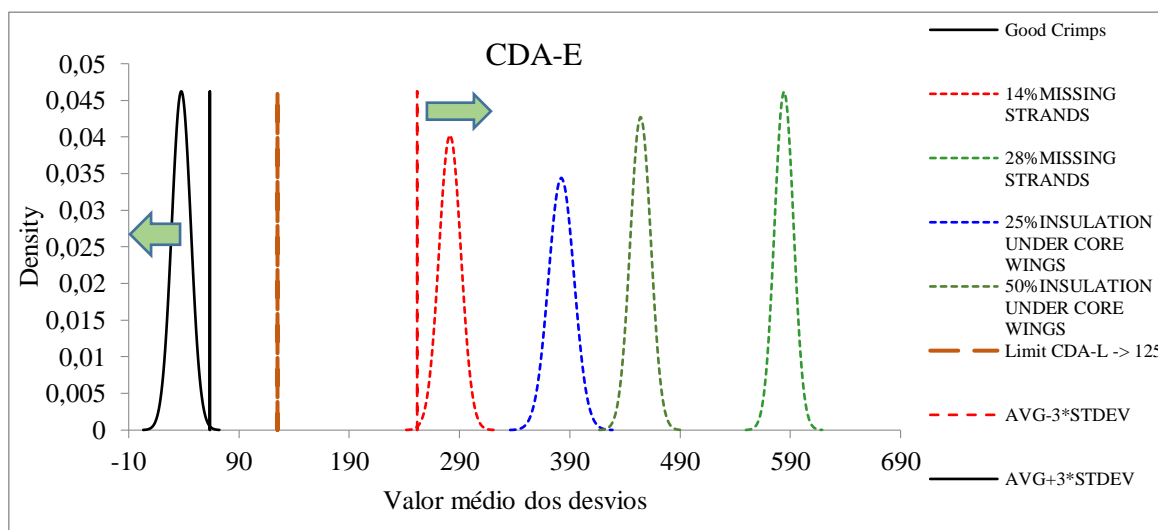


Figura 3.7 - Gráfico resultante de um teste de monitorização

O método para a perceção da capacidade de um sistema de monitorização em detetar os erros de cravamentos na melhor forma ou não, é no fundo facilmente identificado olhando para um gráfico resultante de um estudo de monitorização. O que se procura sempre é então que as curvas da Normal de todos os tipos de erros de cravamento testados quanto à sua deteção para o

erro, se encontrem o mais à direita possível do limite máximo para a detecção de erros definido para cada sistema de monitorização, e simultaneamente afastadas da curva dos bons cravamentos. As médias das curvas dos erros devem ter valores altos. Como referido anteriormente, este limite é de 70 para o sistema de monitorização A, passando a chamar a este limite de BLO (*Bad Limit Overall*), e de 125 para o sistema de monitorização B, com o limite chamado de CDA-L, no exemplo visto na barra vertical a castanho.

Para minimizar a probabilidade de existência de cravamentos defeituosos procura-se também que a curva dos cravamentos bons ou conformes se encontre idealmente o mais perto possível de zero, uma vez que se trata de uma especificação unilateral, a iniciar no zero e terminando no máximo limite para o erro definido para cada um dos sistemas ou limite de cada zona da curva. E como os dados obtidos são sempre em desvios de erro, quanto mais perto de zero melhores serão os resultados. O erro deve ser nulo.

Um gráfico resultante de um teste monitorização é ideal e o processo é estável, quando o limite definido para a detecção do erro se encontra entre as linhas criadas para os valores de  $\mu+3\sigma$  da curva da Normal dos bons cravamentos e  $\mu-3\sigma$  da primeira curva Normal do tipo de erro com a menor média. Estas linhas são chamadas de limites de segurança. Isto é visto também na Figura 3.7. O mesmo é possível ver quando todos os tipos de erro testados são lidos como um erro por parte do sistema de monitorização.

Durante o trabalho, existiu necessidade de incluir melhorias no *template* utilizado para a análise dos dados obtidos. Nomeadamente uma melhoria aos resultados de probabilidades de detecção de erro, com fim a resultados com maior precisão. Mas foram principalmente criadas duas novas funções para uma maior facilidade de leitura e agregação de dados que não existia até então.

Numa primeira nova funcionalidade foram criadas tabelas que automaticamente agregam os dados resultantes de cada sequência de cravamentos, cravamentos conformes e de cada tipo de erro, e fazem um resumo dos dados obtidos mostrando médias e desvios padrão dos resultados por zonas da curva de cravamento e do total. Indicam quantos cravamentos não conformes são detetados, e a sua percentagem de detecção quer por zonas quer no total das curvas resultantes de cravamentos, e ainda a média da força de cravamento no tipo de erro agregado na respetiva tabela. É exemplo de uma destas, o visto na Tabela 3.5 para um teste a um fio de uma secção de 1 mm<sup>2</sup> para o erro por falta de 3 multifilares no fio cravado. Aqui o valor do erro total do desvio de uma curva é chamado de RUO, e os erros de cada zona da curva chamados de RU seguido do respetivo número da zona. Entre parênteses são definidos os limites de detecção.

Tabela 3.5 - Detecção de erros pela falta de multifilares

1,00 mm <sup>2</sup>	3 Multifilares em falta	Detecção	% Detecção	Média	Desvio Padrão	Média do Pico de Força (N)
	RUO (70)	15	100%	109,53	11,03	3,19
	RU1 (32)	0	0%	9,27	2,87	
	RU2 (28)	15	100%	44,80	5,53	
	RU3 (34)	15	100%	55,47	4,96	

Nesta tabela exemplo pode facilmente ser visto o descrito no ponto 3.3.4. Dado se tratar de um erro por falta de multifilares esse erro é detetado nas zonas 2 e 3, bem como no total, mas não na zona 1.

Foi ainda concebida uma segunda funcionalidade que permite ver os mesmos dados mas de forma gráfica e mais apelativa. Criando individualmente gráficos para os dados das médias de erro das 3 zonas da curva de força, do total do erros, e um gráfico apenas para os picos de forças máximas aplicadas durante o cravamento dos terminais. Na Figura 3.8 é apresentado o exemplo de um gráfico das médias do pico de força resultantes de um teste de monitorização. O padrão visto na figura para o comportamento da média das forças é o padrão esperado nos testes realizados, tirar multifilares corresponde a menor força necessária para cravar um terminal uma vez que existe menos material necessário de comprimir.

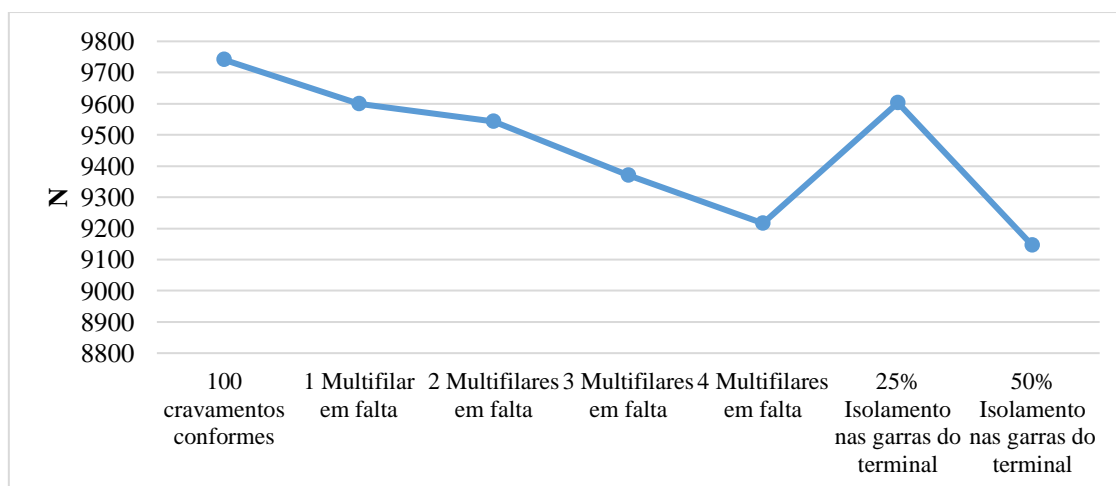


Figura 3.8 - Picos de força média por tipos de erro

Um exemplo gráfico das médias dos erros resultantes do desvio total entre uma curva de referência e as curvas de cravamento seguintes para o mesmo teste de monitorização é visto na Figura 3.9. Com este gráfico é facilmente visível a partir de que ponto o sistema de monitorização começa a ter capacidade de deteção do erro. No exemplo, o erro por falta de 2 multifilares já

consegue ser detetado pelo sistema de monitorização de forças, encontrando-se a sua média acima do valor limite para a deteção do erro de cravamento.

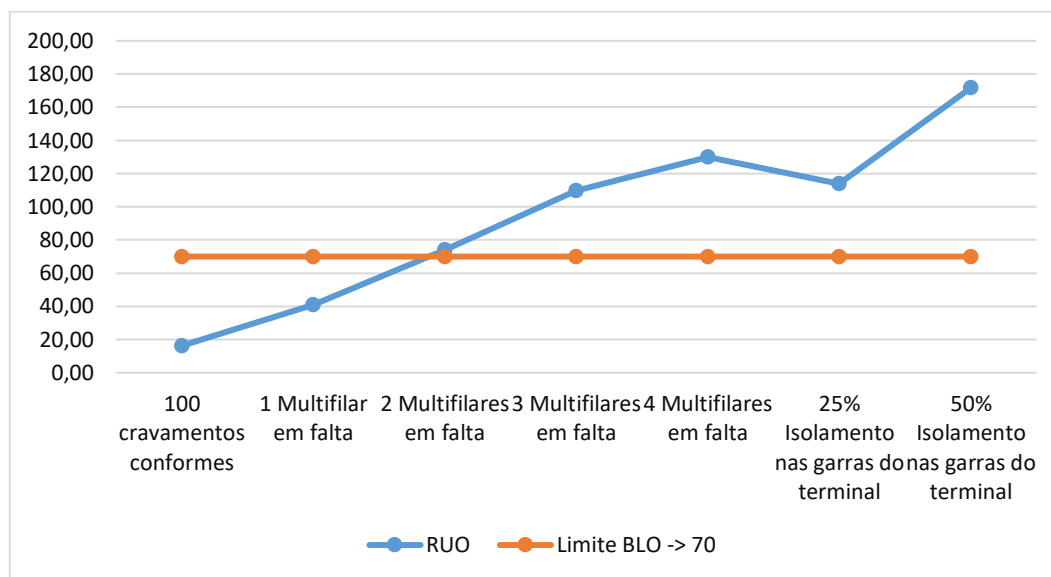


Figura 3.9 - Médias do erro total por cada tipo de erro de cravamento

### 3.5 Estudo do limite ideal de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B

Muitos dos resultados obtidos para cravamentos dentro dos diversos tipos de erro ensaiados (1 multifilar em falta, 25% de isolamento, etc) em vários dos testes realizados, apesar de conhecido esses cravamentos serem não conformes, os mesmos não são detetados como tal perante o sistema de monitorização, e surge a necessidade de implementar melhorias face a este problema.

O método encontrado foi estudar o limite de deteção ideal do erro dado pelo novo sistema de monitorização de forças de cravamento, o ponto crítico a partir do qual todas as diferenças de erro total do cravamento entre a curva de referência e as dos cravamentos feitos a cada instante serão apresentadas como um erro para valores superiores ou iguais ao limite. Limite este que não se encontrava ainda estudado, ou seja, o sistema existia sem um limite que permitisse reduzir erros de deteção e que aumentasse a probabilidade de deteção de não conformidades de cravamentos em toda a produção total de cravamentos.

Isto é conseguido sabendo que por norma existe a separação ideal entre uma curva da Normal dos bons cravamentos e a curva Normal do primeiro tipo de erro testado para o teste de monitorização, a falta de 1 multifilar. Esta separação é tanto melhor quanto maior for a diferença

entre o resultado de  $\mu+3\sigma$  dos cravamentos bons ou conformes e o resultado de  $\mu-3\sigma$  dos cravamentos para o erro por falta de 1 multifilar. São vistos os resultados de todos os testes de monitorização às combinações terminal-fio definidas no ponto anterior para o método de teste padrão e novo método, e calculados os valores  $\mu+3\sigma$  dos cravamentos conformes.

No entanto, e por forma a ser cientificamente correto, é feito o cálculo não só do valor para 3 desvios padrão das médias dos resultados dos desvios para os cravamentos conformes, mas também para o limite superior de especificação (LSE) dos resultados das combinações terminal-fio com base no índice de capacidade do processo  $C_{pk}$ . Uma vez que temos uma produção com especificação técnica unilateral, mais especificamente unilateral à direita dado quanto menor o valor resultante melhor, iremos ter apenas limite superior de especificação para este estudo. Não sendo imposto um valor mínimo para o desvio resultante da curva de um cravamento em relação à de referência, o cálculo do limite inferior de especificação inferior não seria possível de calcular por essa razão, LIE é inexistente. Para a uma especificação unilateral, sabe-se que o processo é capaz quando  $C_{pk}$  é maior ou igual que 1,25. A fórmula para o calculo do LSE é dada por (Pereira & Requeijo, 2012),

$$C_{P_{ks}} = \frac{LSE - \hat{\mu}}{3 \times \sigma} \Leftrightarrow LSE = (C_{P_{ks}} \times 3 \times \sigma) + \hat{\mu} \Leftrightarrow LSE = (1,25 \times 3 * \sigma) + \hat{\mu} \quad (3. 11)$$

Através dos valores resultantes dos limites superiores de especificação calculados, será possível encontrar e perceber qual o valor a poder ser definido como limite ideal de deteção para o erro, tendo em conta os valores de LSE para cada combinação de terminal-fio dos resultados dos cravamentos conformes e se este limite apresenta melhorias face ao atual. Este limite terá que se encontrar por volta do máximo valor de LSE resultante.

### 3.6 Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade

Um dos objetivos do estudo do sistema de medição é avaliar o comportamento do sistema de monitorização quando este interage com o meio onde é utilizado, quantificando e qualificando a variação das medições.

A primeira medida a ser feita antes de abordar um estudo R&R não replicável é garantir que todas as condições que englobam o teste estejam definidas, padronizadas e controladas. Todos os operadores envolvidos devem ser similarmente qualificados e treinados, instruções de trabalho

devem ser detalhadas e definidas, e os equipamentos devem ser calibrados e receber a preparação adequada (Portal Action, 2010).

Para o estudo R&R, foi realizada a experiência segundo as condições habituais de utilização dos equipamentos e com o mesmo método de cravamento utilizado em todo o trabalho e experiências anteriores. O estudo foi feito para o sistema de monitorização de forças B. Fez-se o recurso a 3 operadores treinados e com alguma prática de cravamento no equipamento e local de trabalho onde o estudo foi praticado. Na Tabela 3.6 é apresentada a combinação terminal-fio utilizada.

Tabela 3.6 - Combinação Terminal-Fio estudo R&R

Terminal	Secção do Fio	Nº de multifilares
10756805	0.13 mm <sup>2</sup>	14

Para as condições descritas, cada operador realizou 5 lotes de cravamentos ou corridas, e 4 replicações por cada lote de cravamentos. No total cada operador realiza um total de 20 cravamentos. A Tabela 3.7 esquematiza as experiências feitas ao equipamento.

Tabela 3.7 - Experiências do Estudo R&R

		Lote				
		1A... 1L	2A... 2L	3A... 3L	4A... 4L	5A... 5L
Operador	Operador 1	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>
		r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>
		r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>
		r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>
	Operador 2	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>
		r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>
		r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>
		r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>
	Operador 3	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>
		r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>	r <sub>2</sub>
		r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>	r <sub>3</sub>
		r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>	r <sub>4</sub>

Recolhidos os resultados, a análise dos dados é feita pelos métodos da ANOVA e estudo R&R não replicável descritos no ponto 2.4.1 do capítulo 2.

Neste ponto é efetuado um teste segundo a distribuição de Fisher às diferenças entre avaliadores, efeito do operador, e um teste às diferenças para as corridas realizadas, efeito do lote hierarquizado ao operador. As hipóteses a testar para a diferença entre avaliadores são,



$$\begin{aligned} H_0: \sigma^2_A &= 0 \\ H_1: \sigma^2_A &> 0 \end{aligned} \quad (3.12)$$

A hipótese nula rejeita-se quando,

$$F_0 > F_{1-\alpha; (a-1); (a(b-1))} \quad (3.13)$$

As hipóteses a testar para o teste à diferença entre corridas são,

$$\begin{aligned} H_0: \sigma^2_{B(A)} &= 0 \\ H_1: \sigma^2_{B(A)} &> 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

E é rejeitada a hipótese nula quando,

$$F_0 > F_{1-\alpha; (a(b-1)); (n-1)ab} \quad (3.15)$$

A variação resultante de cada fator no estudo R&R pode ser comparada com a variação total. Através desta comparação é verificado se o sistema de monitorização B é aceitável para a característica em estudo. A percentagem de tolerância face à largura da especificação indica da mesma forma se o sistema consegue medir de forma adequada a característica da qualidade, sendo neste caso o erro resultante da curva de força. A tolerância (TOL) é igual ao limite superior de especificação menos o limite inferior, e estando num perfil unilateral, TOL será igual a 125. A Tabela 3.8 apresenta o formulário dos cálculos efetuados para as percentagens de contribuição.

Tabela 3.8 – Cálculo das percentagens de variação e tolerância

Fonte de Variação	Desvio Padrão	% De Variação	%Tolerância
Repetibilidade	VE	$(VE/VT) \times 100$	$(3 \times (VE/TOL)) \times 100$
Reprodutibilidade	VO	$(VO/VT) \times 100$	$(3 \times (VO/TOL)) \times 100$
Peça	VP	$(VP/VT) \times 100$	$(3 \times (VP/TOL)) \times 100$
R&R	R&R	$\frac{(R\&R/VT) \times 100}{100}$	$(3 \times (R\&R/TOL)) \times 100$
Total	VT	100	$(3 \times (VT/TOL)) \times 100$

Aqui, a aceitação ou não do sistema de monitorização é feita de seguinte forma (Jorge, 2010),

- %R&R entre 0 e 10% da variação total, aceitável
- %R&R entre 11 e 30% da variação total, pode ser aceite em algumas aplicações
- %R&R maior que 30% da variação total, não aceitável

Para % Tolerância, estes valores de aceitação são também utilizados.

Por fim, é determinado o número de classes que o sistema de monitorização consegue distinguir. Onde qualquer sistema com um número de classes igual a 1 é inadequado, 2 a 4 classes distintas é aceitável, e um sistema que distinga mais do que 5 classes distintas é considerado o ideal. O numero de classes é dado por (AIAG, 2010),

$$NC = 1.41 \times \frac{VP}{R\&R} \quad (3.16)$$

### 3.7 Estudo das características dinâmicas de Taguchi

Para o estudo das características dinâmicas, aplicou-se a metodologia de Taguchi a dados recolhidos de testes feitos a ambos os sistemas de monitorização de forças A e B. Foi calculada a razão sinal-ruído (S/N) para cada gama de valores recolhida por cada sistema de monitorização, procurando aquela que maximiza o sinal face ao ruído do processo.

Foram vistos todos os valores recolhidos e verificou-se que não seria possível fazer a análise com os valores e médias resultantes devido à equidistância entre valores. Assim são seleccionadas apenas combinações de terminal-fio de forma a estas serem o mais equidistantes possível entre si e possam ser comparadas desta forma. A combinação feita com o fio de secção 0,35 mm<sup>2</sup> foi retirada deste estudo. Na Tabela 3.9 estão referidas as combinações terminal-fio incluídas no estudo.

Tabela 3.9 - Combinações Terminal-Fio características dinâmicas de Taguchi

Terminal	Secção do Fio	Nº de multifilares
10756805	0,13 mm <sup>2</sup>	14
10864929	0,50 mm <sup>2</sup>	19
10864929	1 mm <sup>2</sup>	32

Para cada combinação terminal-fio foram recolhidos resultados do erro entre curvas de cravamento e de referência para 10 cravamentos diferentes por cada sistema de monitorização de forças de cravamento. A Tabela 3.10 esquematiza as experiências feitas aos sistemas de monitorização de forças A e B.

Tabela 3.10 - Experiências do Estudo de características dinâmicas de Taguchi

	<b>M1</b>	<b>M2</b>	<b>M3</b>
	<b>1 mm<sup>2</sup></b>	<b>0,50 mm<sup>2</sup></b>	<b>0,13 mm<sup>2</sup></b>
Leituras	y <sub>11</sub>	y <sub>21</sub>	y <sub>31</sub>
	y <sub>12</sub>	y <sub>22</sub>	y <sub>32</sub>
	y <sub>13</sub>	y <sub>23</sub>	y <sub>33</sub>
	y <sub>14</sub>	y <sub>24</sub>	y <sub>34</sub>
	y <sub>15</sub>	y <sub>25</sub>	y <sub>35</sub>
	y <sub>16</sub>	y <sub>26</sub>	y <sub>36</sub>
	y <sub>17</sub>	y <sub>27</sub>	y <sub>37</sub>
	y <sub>18</sub>	y <sub>28</sub>	y <sub>38</sub>
	y <sub>19</sub>	y <sub>29</sub>	y <sub>39</sub>
	y <sub>110</sub>	y <sub>210</sub>	y <sub>310</sub>
Total (y <sub>i</sub> )	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>

O estudo das características dinâmicas para os dados recolhidos é feito pelos cálculos descritos no ponto 2.5 do capítulo 2 para a equação linear.

Para a reta sinal-resposta vista graficamente, os valores do fator área da secção do fio são colocados no eixo das abcissas, e colocados de forma inversa ao que seria de supor, ou seja da maior área para a mais pequena, de 1 mm<sup>2</sup> para 0,13 mm<sup>2</sup>. Isto é justificado na medida da dificuldade de monitorização, que por norma quanto mais pequenos os componentes fio e terminal mais difícil será também a sua monitorização, resultando em valores superiores na média dos resultados do erro para as secções de menor área. Isto é também resultado da dificuldade humana existente, ao sermos cada vez menos eficazes em manusear objetos que por sua vez são cada vez menores em dimensão. O resultado é então uma reta onde o seu declive é positivo, caso contrário seria apresentada uma reta sinal-resposta com um declive de valor negativo.



## 4. Resultados e Discussão

Neste capítulo, é feita a análise aos sistemas de monitorização de forças de cravamento e dos dados recolhidos dos estudos realizados. Utilizando o teste à diferença entre médias procura-se um novo método de estudo que permita chegar a resultados que não sejam significativamente diferentes. Em seguida os resultados dos testes de monitorização a ambos os sistemas de monitorização de forças de cravamento são apresentados e comparados quanto à melhor deteção para erros de cravamento. É visto o resultado e como se chegou ao mesmo para o novo limite de deteção de erros no sistema de monitorização de forças de cravamento B. O estudo R&R determina em seguida se existe capacidade por parte do sistema de monitorização de forças B para a medição de resultados do erro de cravamento. Por fim, utilizando o método de Taguchi para características dinâmicas, determina-se a razão sinal-ruído de cada sistema de monitorização de forças testado e qual o sistema que de a melhor forma permite maximizar o sinal face ao ruído do processo.

### 4.1 Estudo de um novo método de teste aos sistemas de monitorização

Para as combinações de terminal-fio descritas na Tabela 3.3, e a recolha de amostras segundo a metodologia identificada na Tabela 3.2, são apresentados os resultados obtidos para as médias e desvios padrão das amostras recolhidas para o estudo da viabilidade do novo método de estudo ou teste de monitorização, aplicado aos sistemas de monitorização de forças de cravamento.

Quando a obtenção de dados não é justificável, é apresentado na tabela vista em seguida um traço a preto na célula correspondente. Isto acontece quando as classes de tipos de erro testados para a deteção de cravamentos não conformes numa combinação terminal-fio, apresentam resultados positivos de deteção logo desde o primeiro tipo de erro testado. Por exemplo, se ao retirar 1 e 2 multifilares esses erros de cravamento são já detetados, não existe necessidade de continuar o processo. Na Tabela 4.1 e Tabela 4.2 são apresentados os resultados das amostras recolhidas.

Tabela 4.1 – Médias para os erros dos testes aos sistemas de monitorização A e B

Mult.	Secção	S. de Monit.	T. de monitorização	Médias						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
32	1 mm <sup>2</sup>	Sistema B	Padrão	27,29	66,06	103,24	225,33	284,55	277,29	367,69
			Novo método	27,82	65,04	101,21	224,27	281,56	277,74	364,46
		Sistema A	Padrão	16,31	40,80	73,87	109,53	129,80	113,80	171,67
			Novo método	16,20	40,57	73,57	109,43	130,14	113,71	171,43
7	0,35 mm <sup>2</sup>	Sistema B	Padrão	37,79	281,37	584,27	-	-	382,33	454,17
			Novo método	36,29	281,70	582,00	-	-	381,61	455,34
		Sistema A	Padrão	18,64	105,87	233,33	-	-	215,13	325,93
			Novo método	20,96	103,57	231,14	-	-	213,43	323,14

Tabela 4.2 – Desvios padrão do erro dos testes aos sistemas de monitorização A e B

Mult.	Secção	S. de Monit.	T. de monitorização	Desvios padrão						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
32	1 mm <sup>2</sup>	Sistema B	Padrão	14,48	17,84	12,37	15,7	19,18	21,51	27,55
			Novo método	13,27	16,51	8,56	15,89	12,97	15,76	21,54
		Sistema A	Padrão	5,96	5,57	7,45	11,03	5,98	11,56	9,32
			Novo método	4,79	4,24	5,65	12	3,76	8,08	14,15
7	0,35 mm <sup>2</sup>	Sistema B	Padrão	8,63	9,91	8,64	-	-	11,59	9,34
			Novo método	8,74	9,58	7,84	-	-	6,23	6,18
		Sistema A	Padrão	6,22	8,43	9,95	-	-	10,41	9,15
			Novo método	6,6	7,18	7,36	-	-	5,03	18,03

Foi aplicado segundo a metodologia apresentada no ponto 3.3 o teste estatístico de hipóteses à diferença entre duas médias, com variâncias desconhecidas. Não descartando a necessidade de proceder sempre ao teste de hipóteses à diferença entre variâncias em primeiro lugar.

#### 4.1.1 Diferença entre médias para o sistema de monitorização de forças A

No teste à diferença entre variâncias, para os cravamentos bons ou conformes nos testes ao sistema de monitorização de forças de cravamento A, para um  $\alpha = 5\%$  com  $n_1 = 100$  e  $n_2 = 50$ , o  $F_{\text{crítico}}$  à direita é dado por  $F_{0,025;99,49} = 1,656$ , e o  $F_{\text{crítico}}$  à esquerda dado por  $F_{0,975;99,49} = 0,628$ . Nos testes às classes de tipos de erro de cravamento, para um  $\alpha = 5\%$  e  $n_1 = 15$  e  $n_2 = 7$ , o  $F_{\text{crítico}}$  à direita é dado por  $F_{0,025;14,6} = 5,297$ , e o  $F_{\text{crítico}}$  à esquerda dado por  $F_{0,975;14,6} = 0,286$ . A Tabela 4.3 apresenta os resultados dos cálculos efetuados.

Tabela 4.3 - Teste à diferença entre variâncias no sistema de monitorização A

S. de Monit.	Mult.	Secção	T. de monitorização	Teste à diferença entre variâncias						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
Sistema de monitorização A	32	1 mm <sup>2</sup>	Padrão	5,96	5,57	7,45	11,03	5,98	11,56	9,32
			Novo método	4,79	4,24	5,65	12	3,76	8,08	14,15
			F <sub>0</sub>	1,548	1,726	1,739	0,845	2,529	2,047	0,434
			F <sub>crit. Direita</sub>	1,656	5,297					
			F <sub>crit. Esquerda</sub>	0,628	0,286					
			Padrão	6,22	8,43	9,95	-	-	10,41	9,15
	7	0,35 mm <sup>2</sup>	Novo Método	6,60	7,18	7,36	-	-	5,03	18,03
			F <sub>0</sub>	0,888	1,378	1,828	-	-	4,283	0,258
			F <sub>crit. Direita</sub>	1,656	5,297		-	-	5,297	
			F <sub>crit. Esquerda</sub>	0,628	0,286		-	-	0,286	

Como o valores de  $F_0 < F_{0,025;99,49}$  e  $F_0 > F_{0,975;99,49}$ , a hipótese nula não é rejeitada para a maioria dos valores exceto para os erros de cravamento com 50% de isolamento dentro das garras do cravamento para a secção de fio 0,35 mm<sup>2</sup>, onde  $F_0$  é menor do que  $F_{0,025;99,4}$ . A diferença entre variâncias para um  $\alpha = 5\%$  não é significativamente diferente, exceto para o erro de cravamento com 50% de isolamento dentro das garras onde se rejeita a hipótese nula.

Para o teste à diferença entre as médias, para um  $\alpha = 5\%$  com  $n_1 = 100$  e  $n_2 = 50$ ,  $t_{\text{crít.}}$  é dado por  $t_{0,025;148} = 1,976$ . Nos testes às classes de tipos de erro de cravamentos, para um  $\alpha = 5\%$  e  $n_1 = 15$  e  $n_2 = 7$ , o  $t_{\text{crít.}}$  é dado por  $t_{0,025;20} = 2,086$ . Como os valores das variâncias para o erro de cravamentos com 50% de isolamento dentro das garras do cravamento para a secção de fio 0,35 mm<sup>2</sup> são significativamente diferentes, o  $t_{\text{crít.}}$  será dado por  $t_{0,025;7} = 2,365$ . De notar que neste último caso o valor de  $S_p$  será omissos e não utilizado para os cálculos. A Tabela 4.4 apresenta os resultados dos cálculos efetuados.

Tabela 4.4 - Teste à diferença entre médias no sistema de monitorização A

S. de Monit.	Mult.	Secção	T. de monitorização	Teste à diferença entre médias						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
Sistema de monitorização A	32	1 mm <sup>2</sup>	Padrão	16,31	40,8	73,87	109,53	129,8	113,8	171,67
			Novo método	16,20	40,57	73,57	109,43	130,14	113,71	171,43
			S <sub>p</sub>	5,60	5,21	6,96	11,33	5,41	10,64	10,99
			t <sub>0</sub>	0,113	0,097	0,094	0,019	-0,137	0,018	0,048
			t <sub>crit.</sub>	1,976	2,086					
	7	0,35 mm <sup>2</sup>	Padrão	18,64	105,87	233,33	-	-	215,13	325,93
			Novo método	20,96	103,57	231,14	-	-	213,43	323,14
			S <sub>p</sub>	6,35	8,08	9,25	-	-	9,13	12,50
			t <sub>0</sub>	-2,110	0,622	0,517	-	-	0,407	0,387
			t <sub>crit.</sub>	1,976	2,086					

Para a diferença entre médias para cravamentos conformes na secção 0,35 mm<sup>2</sup> rejeita-se a hipótese nula. Para todos os restantes valores, onde  $t_0 < t_{crit.}$  não existem evidências para rejeitar a hipótese nula em nenhuma das combinações de valores de médias, para um  $\alpha = 5\%$ . Os valores da diferença entre médias não são significativamente diferentes.

#### 4.1.2 Diferença entre médias para o sistema de monitorização de forças B

No teste à diferença entre variâncias, para os cravamentos bons ou conformes nos testes ao sistema de monitorização de forças B, para um  $\alpha = 5\%$  com  $n_1 = 100$  e  $n_2 = 50$ , o  $F_{crítico}$  à direita é dado por  $F_{0,025;99,49} = 1,656$ , e o  $F_{crítico}$  à esquerda dado por  $F_{0,975;99,49} = 0,628$ . Nos testes às classes de tipos de erro de cravamento, para um  $\alpha = 5\%$  e  $n_1 = 15$  e  $n_2 = 7$ , o  $F_{crítico}$  à direita é dado por  $F_{0,025;14,6} = 5,297$ , e o  $F_{crítico}$  à esquerda dado por  $F_{0,975;14,6} = 0,286$ . Os valores de  $F_{crit.}$  para o sistema A e B são iguais, pois apresentam dimensões de amostras também elas iguais. A Tabela 4.5 apresenta os resultados aos cálculos efetuados.



Tabela 4.5 - Teste à diferença entre variâncias no sistema de monitorização B

S. de Monit.	Mult.	Secção	T. de monitorização	Teste à diferença entre variâncias						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
Sistema de monitorização B	32	1 mm <sup>2</sup>	Padrão	14,48	17,84	12,37	15,7	19,18	21,51	27,55
			Novo método	13,27	16,51	8,56	15,89	12,97	15,76	21,54
			F <sub>0</sub>	1,191	1,168	2,088	0,976	2,187	1,863	1,636
			F <sub>crit. Direita</sub>	1,656	5,297					
			F <sub>crit. Esquerda</sub>	0,628	0,286					
	7	0,35 mm <sup>2</sup>	Padrão	8,63	9,91	8,64	-	-	11,59	9,34
			Novo Método	8,74	9,58	7,84	-	-	6,23	6,18
			F <sub>0</sub>	0,975	1,070	1,214	-	-	3,461	2,284
			F <sub>crit. Direita</sub>	1,656	5,297		-	-	5,297	
			F <sub>crit. Esquerda</sub>	0,628	0,286		-	-	0,286	

Como todos os valores de  $F_0 < F_{0,025;99,49}$  e  $F_0 > F_{0,975;99,49}$ , não existem evidências para rejeitar a hipótese nula para um  $\alpha = 5\%$ . A diferença entre variâncias para um  $\alpha = 5\%$  não é significativamente diferente.

Para o teste à diferença entre duas médias, para um  $\alpha = 5\%$  com  $n_1 = 100$  e  $n_2 = 50$ ,  $t_{crit.}$  é dado por  $t_{0,025;148} = 1,976$ . Nos testes às classes de tipos de erro de cravamento, para um  $\alpha = 5\%$  e  $n_1 = 15$  e  $n_2 = 7$ , o  $t_{crit.}$  é dado por  $t_{0,025;20} = 2,086$ . A Tabela 4.6 apresenta os resultados dos cálculos efetuados.

Tabela 4.6 - Teste à diferença entre médias no sistema de monitorização B

S. de Monit.	Mult.	Secção	T. de monitorização	Teste à diferença entre médias						
				Cravamentos bons	1 Mult. Em falta	2 Mult. Em falta	3 Mult. em falta	4 Mult. em falta	25% isol. nas garras do terminal	50% isol. nas garras do terminal
Sistema de monitorização B	32	1 mm <sup>2</sup>	Padrão	27,29	66,06	103,24	225,33	284,55	277,29	367,69
			Novo Método	27,82	65,04	101,21	224,27	281,56	277,74	364,46
			S <sub>p</sub>	14,09	17,45	11,36	15,76	17,55	19,96	25,89
			t <sub>0</sub>	-0,217	0,128	0,390	0,147	0,372	-0,049	0,273
			t <sub>crit.</sub>	1,976	2,086					
	7	0,35 mm <sup>2</sup>	Padrão	37,79	281,37	584,27	-	-	382,33	454,17
			Novo método	36,29	281,7	582,00	-	-	381,61	455,34
			S <sub>p</sub>	8,67	9,81	8,41	-	-	10,28	8,52
			t <sub>0</sub>	0,999	-0,073	0,590	-	-	0,153	-0,300
			t <sub>crit.</sub>	1,976	2,086		-	-	2,086	

Como todos os valores de  $t_0 < t_{crit.}$  não existem evidências para rejeitar a hipótese nula em nenhuma das combinações de valores de médias, para um  $\alpha = 5\%$ . Os valores da diferença entre médias não são significativamente diferentes.

Com base nos resultados obtidos, consegue ser visto que utilizando apenas metade das dimensões das amostras no método padrão de estudo, para cravamentos tanto conformes como não conformes, que os resultados das médias dos erros obtidas podem ser consideradas as mesmas com uma diferença não significativa. A utilização do novo método de estudo pode assim desta forma ser considerado viável.

## 4.2 Estudo comparativo dos sistemas de monitorização de forças por combinação terminal-fio

Como visto no ponto 4.1, concluiu-se não haver diferenças significativas na utilização de um novo método de teste de monitorização aos sistemas de monitorização de forças de cravamento. É por isso usado o novo método de teste para obter os resultados dos testes de monitorização a combinações terminal-fio de diferentes secções aqui apresentados.

### 4.2.1 Combinação terminal-fio 0,13 mm<sup>2</sup>

Para a combinação terminal-fio de menor secção estudada, 0,13 mm<sup>2</sup>, o valor a partir do qual o sistema de monitorização de forças de cravamento A consegue detetar a ausência de multifilares, ou erros de cravamento, com segurança é a partir da falta de 2 multifilares, 14% falta de multifilares (*missing strands*). Para esta combinação, as características do terminal e fio não permitiam que fossem testados erros por isolamento no interior das garras de cravamento. As curvas da normal dos valores dos cravamentos conformes e da falta de 1 multifilar apresentam uma grande sobreposição para a deteção do erro, como visto na Figura 4.1. Para a ausência de 2 multifilares no fio existe também alguma sobreposição com a área de ausência de deteção para o erro.

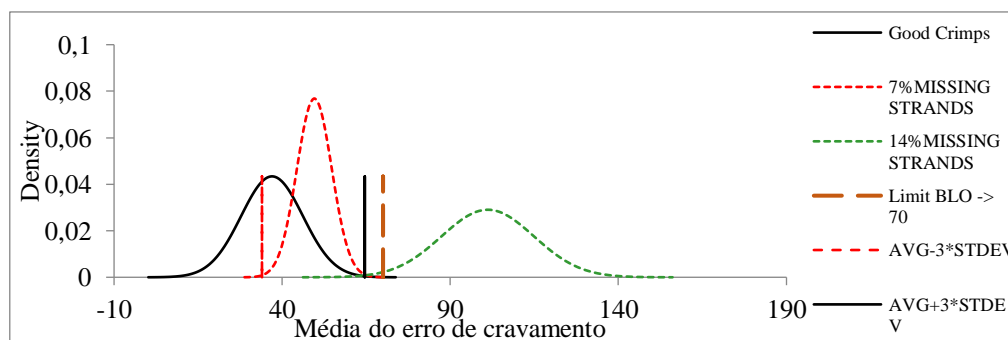


Figura 4.1 – Combinação terminal-fio 0,13 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento B, o valor a partir do qual o sistema consegue detetar a ausência de multifilares com segurança é de igual forma a partir da ausência de 2 multifilares. No entanto, como pode ser visto na Figura 4.2, as curvas da normal dos valores dos cravamentos conformes e de erro por falta de 2 multifilares apresentam para este sistema uma boa separação entre curvas, o que indica uma melhor separação dos valores do erro de cravamentos no sistema de monitorização B e de forma mais fiável. O erro a partir do qual a deteção de não conformidades existe encontra-se consideravelmente afastado do limite de deteção de erros, de valor 125.

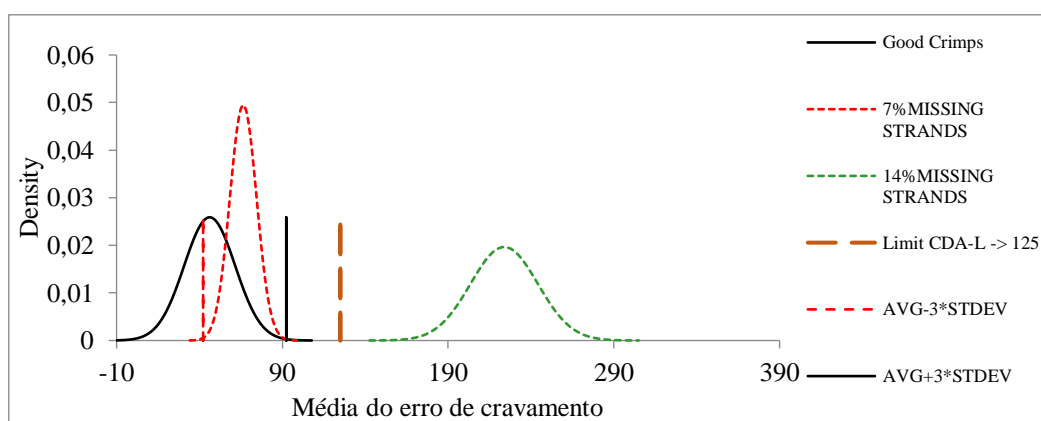


Figura 4.2 – Combinação terminal-fio 0,13 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B

Para a combinação terminal-fio de secção 0,13 mm<sup>2</sup>, o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresenta para os dados recolhidos uma melhor deteção para os erros de cravamento.

#### 4.2.2 Combinação terminal-fio 0,35 mm<sup>2</sup>

Para a combinação terminal-fio estudada de secção 0,35 mm<sup>2</sup>, o valor a partir do qual o sistema de monitorização de forças de cravamento A consegue detetar a ausência de multifilares ou isolamento nas garras do terminal é automaticamente a partir da falta de 1 multifilar, 14% falta de multifilares. As curvas da normal dos valores dos cravamentos por falta de multifilares e isolamento dentro das garras de cravamento apresentam alguma sobreposição para a deteção do erro, como visto na Figura 4.3, afastando-se no entanto do limite de valor 70.

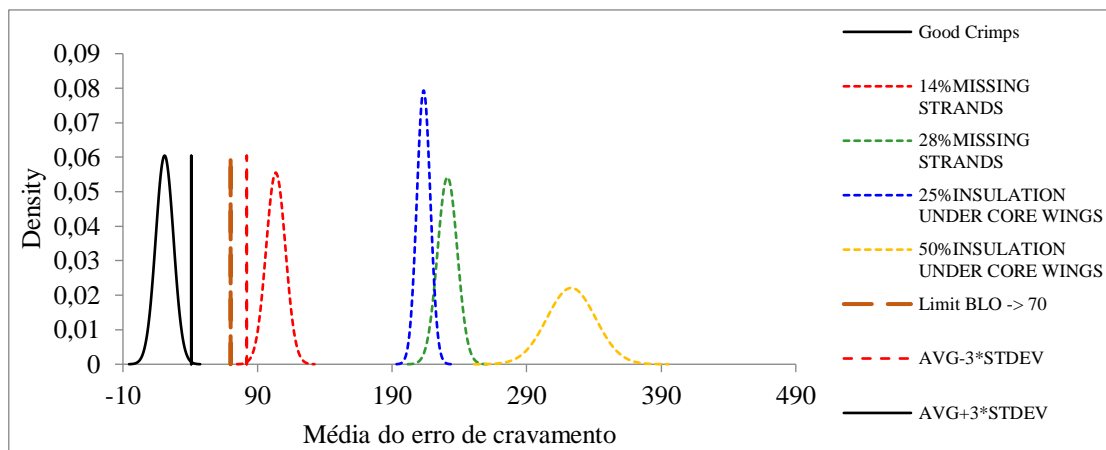


Figura 4.3 – Combinação terminal-fio 0,35 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento B, o valor a partir do qual o sistema consegue detetar a ausência de multifilares ou presença de isolamento é de igual forma a partir da ausência de um único multifilar. Também para esta combinação terminal-fio, como visto na Figura 4.4, as curvas da normal dos valores dos cravamentos conformes e as do erro por falta de multifilares e também isolamento nas garras do terminal, apresentam para este sistema uma boa separação entre curvas. A separação ideal de curvas é conseguida nos valores obtidos para os erros de cravamento no sistema de monitorização de forças de cravamento B.

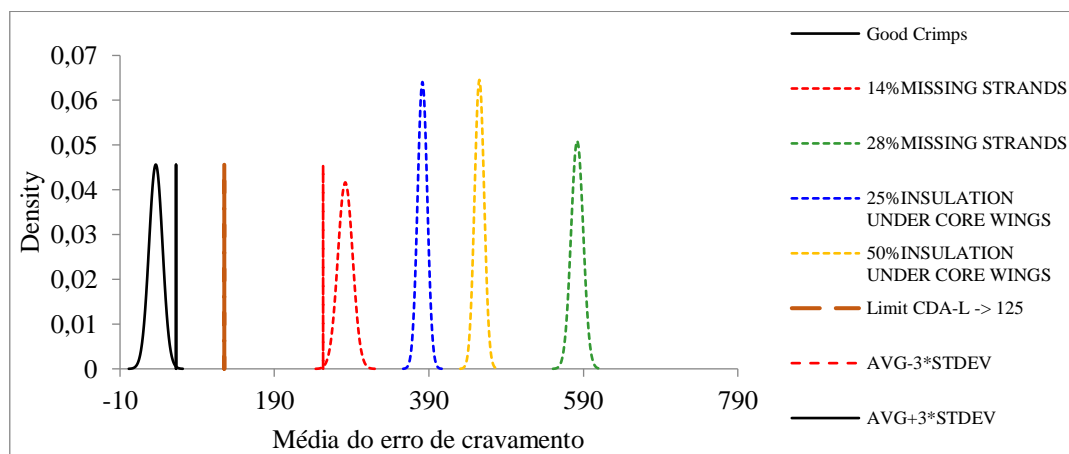


Figura 4.4 – Combinação terminal-fio 0,35 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B

Para a combinação terminal-fio de secção 0,35 mm<sup>2</sup>, o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresenta para os dados recolhidos dos testes realizados uma melhor deteção para os erros de cravamento com uma boa separação dos valores.

### 4.2.3 Combinação terminal-fio 0,50 mm<sup>2</sup>

Para a combinação terminal-fio estudada de secção 0,50 mm<sup>2</sup>, o valor a partir do qual o sistema de monitorização de forças de cravamento A consegue detetar a ausência de multifilares, ou presença de isolamento no terminal quando cravado, com segurança é a partir da falta de 1 único multifilar, 5% falta de multifilares. As curvas da normal dos valores dos cravamentos por falta de multifilares e isolamento dentro das garras do terminal apresentam alguma sobreposição para a deteção do erro, como visto na Figura 4.5. Com uma possível probabilidade para o erro de cravamento por falta de 1 multifilar poder vir a ter um resultado que cai atrás do limite definido de valor igual a 70 e ser considerado assim como um cravamento conforme.

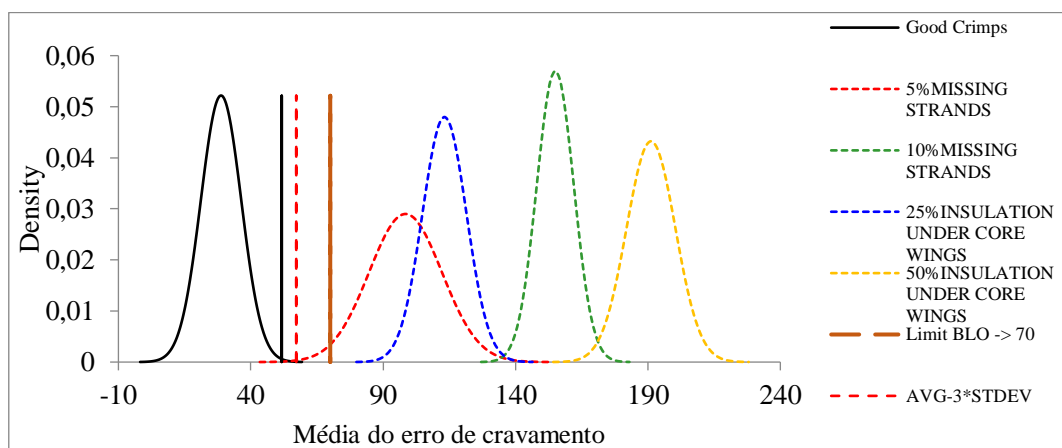


Figura 4.5 – Combinação terminal-fio 0,50 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento B, o valor a partir do qual o sistema consegue detetar a ausência de multifilares com confiança é a partir da ausência de 3 multifilares, 15% falta de multifilares como é observado na Figura 4.6.

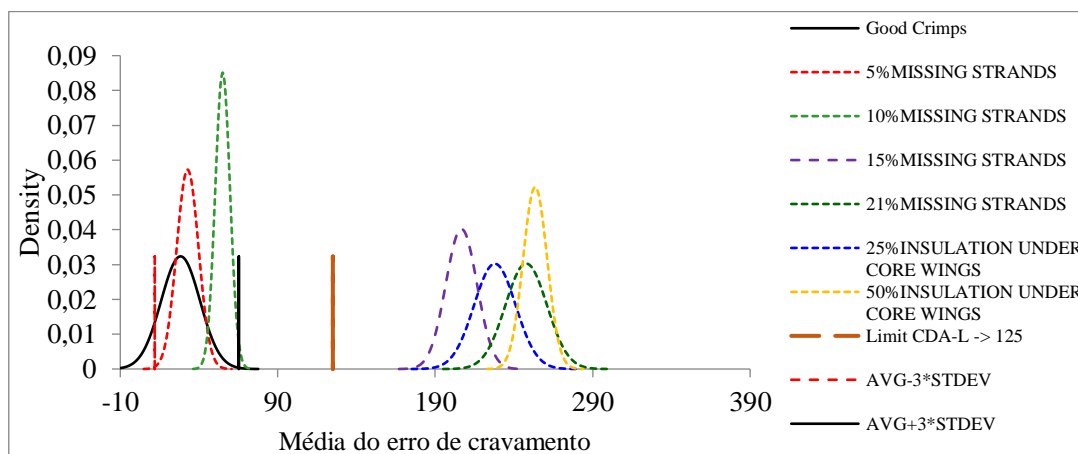


Figura 4.6 – Combinação terminal-fio 0,50 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B

Na secção de 0,50 mm<sup>2</sup>, existe uma diferença drástica devido ao facto de no teste realizado para o sistema de monitorização de forças de cravamento A terem ocorrido interferências eletromagnéticas na prensa onde foram realizados todos os cravamentos. Assim para o sistema de monitorização de forças de cravamento B existem apenas erros detetados após retirados 3 multifilares ao fio utilizado. No entanto, tratando-se de um fio onde a sua constituição inclui 19 multifilares, e a falta de 3 multifilares representa 15% da falta de multifilares, presume-se que a detecção de erros apenas na falta de 3 multifilares seja de facto a correta. Acima de 10% de falta de material no interior do fio.

Para esta combinação terminal-fio, as curvas da normal dos valores dos cravamentos conformes e as do erro por falta de multifilares e também isolamento nas garras do terminal, apresentam para este sistema uma boa separação entre curvas. A separação ideal de curvas é conseguida para os valores obtidos nos erros de cravamento no sistema de monitorização de forças de cravamento B. Mesmo para as curvas da normal de erros não detetados que se encontram confundidas com a curva dos cravamentos conformes mas separadas das restantes e do limite de detecção para o erro.

Para a combinação terminal-fio de secção 0,50 mm<sup>2</sup>, o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresenta para os dados recolhidos dos testes realizados uma melhor detecção para os erros de cravamento com uma boa separação dos valores, apesar da aparente melhor detecção de erros para o sistema de monitorização de forças de cravamento A.

#### **4.2.4 Combinação terminal-fio 1 mm<sup>2</sup>**

Para a combinação terminal-fio estudada de secção igual a 1 mm<sup>2</sup>, o valor a partir do qual o sistema de monitorização de forças de cravamento A consegue detetar a ausência de multifilares ou presença de isolamento no terminal cravado com segurança é a partir da falta de 2 multifilares, 6% falta de multifilares. Para a curva da normal dos resultados do erro pela falta de 2 multifilares, como visto na Figura 4.7 existe no entanto alguma probabilidade de os valores caírem à esquerda do limite de detecção para o erro de cravamentos igual a 70, podendo considerar um cravamento como conforme nessas condições. As restantes curvas da normal dos erros por falta de multifilares e isolamento nas garras do terminal apresentam alguma sobreposição para a detecção do erro.

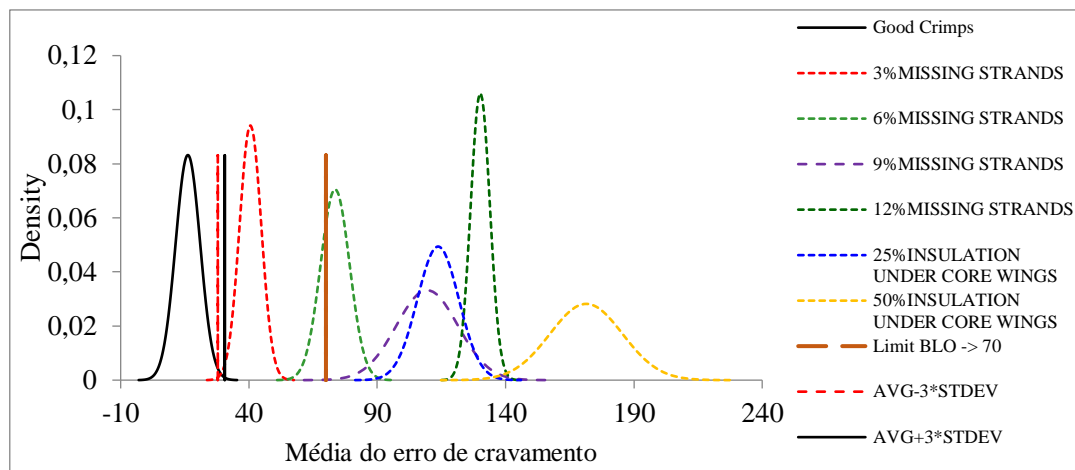


Figura 4.7 – Combinação terminal-fio 0,50 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças A

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento B, o valor a partir do qual o sistema consegue detetar a ausência de multifilares com confiança é a partir da ausência de 3 multifilares, 9% falta de multifilares como é observado na Figura 4.8. Contrariamente ao observado para o sistema de monitorização de forças de cravamento A, não existem probabilidades aqui para os dados obtidos de cravamentos serem considerados conformes de forma errada. Isto provem da boa separação entre curvas da normal, que existe entre as curvas dos erros de cravamento e das conformes à esquerda do limite de deteção para o erro.

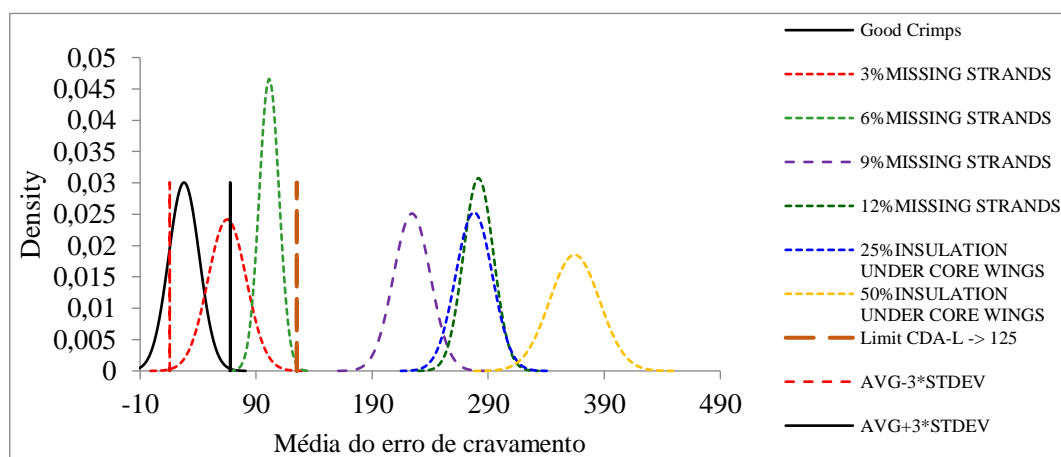


Figura 4.8 – Combinação terminal-fio 0,50 mm<sup>2</sup> – Sistema de monitorização de forças B

Apesar de para o obtido no sistema de monitorização de forças de cravamento B serem apenas detetados erros após a falta de 3 multifilares, a separação entre curvas é bastante boa e um fator relevante para a maior robustez de um sistema de monitorização de erros de cravamento. Desta forma para a combinação terminal-fio de secção igual a 1 mm<sup>2</sup>, o sistema de monitorização de forças de cravamento B é considerado para os dados recolhidos e testes realizados como tendo a melhor deteção para os erros de cravamento e com uma separação ideal de valores.

Para todas as combinações terminal-fio de diferente secção foi possível verificar que existe por norma uma muito boa separação entre as curvas da normal para os cravamentos considerados conformes e as dos cravamentos não conformes, erros por falta de multifilares e isolamento nas garras do terminal cravado, detetados pelo sistema de monitorização de forças de cravamento B. A Tabela 4.7 faz o resumo do tipo de erro (falta de multifilares) em cada combinação de terminal-fio estudada para os sistema de monitorização de forças de cravamento A e de monitorização B, a partir do qual é possível detetar não conformidades em cravamentos.

Tabela 4.7 – Início para a deteção de não conformidades por sistema de monitorização de forças de cravamento

Secção [mm <sup>2</sup> ]	Nº Multifilares	10% N° Mult.	Nº de multifilares em falta	
			Sistema de Monitorização A	Sistema de Monitorização B
<b>0,13</b>	14	1,4 $\cong$ 1	2	2
<b>0,35</b>	7	0,7 $\cong$ 1	1	1
<b>0,5</b>	19	1,9 $\cong$ 2	1	3
<b>1</b>	32	3,2 $\cong$ 3	2	3

### 4.3 Estudo do limite ideal de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B

Sabe-se que a falta de 1 ou 2 multifilares em fios de número elevado de multifilares tem pouca ou praticamente influência nula na condutividade elétrica dos mesmos, ou seja até a falta de até 10% de multifilares a falha não é crítica. Assim, mesmo que não seja possível detetar na totalidade todos os erros pela falta de multifilares, pode no entanto ser possível detetar a falta de mais erros do que no modelo atual com um limite de deteção para o erro existente igual a 125 CDA-L. Se baixarmos este limite ao ponto de detetar os erros para a falta de 1 e 2 multifilares ou mesmo parte destes, mesmo não sendo possível detetar de qualquer forma totalmente nenhum deles, já estamos a reduzir terminais que seguem o seu caminho depois de produção e que não se encontram totalmente conformes a 100% de acordo com a especificação. Para o estudado, na Tabela 4.8 são vistos o número de multifilares retirados a um fio necessários para existir a deteção de um erro ou não conformidade.



Tabela 4.8 – Falta de multifilares necessária para a detecção de cravamentos não conformes

[mm <sup>2</sup> ]	T. de monitorização	Nº Multifilares	Deteta quando?		
			Nº multifilares em falta	% Multifilares em falta	Média do erro
0,13	50 Cravamentos	14	2	14,3%	223,86
0,35	100 Cravamentos	7	1	14,3%	281,37
	50 Cravamentos	7	1	14,3%	281,70
0,5	50 Cravamentos	19	3	15,8%	206,64
1	100 Cravamentos	32	3	9,4%	225,33
	50 Cravamentos	32	3	9,4%	224,27

Para obter o limite ideal, foram feitos em primeiro lugar os cálculos para os valores do limite superior de especificação (LSE) para os cravamentos conformes por cada tipo de secção de fio e terminal, combinação terminal-fio, e foi tentado desta forma encontrar um valor de CDA-L para o qual fosse possível melhorar a detecção em relação ao limite estabelecido atual igual a 125.

Cada LSE pode ser obtido pela equação (3.11). Segue o exemplo do procedimento para obter o valor de LSE para a combinação de terminal-fio de secção 0,13 mm<sup>2</sup>.

$$LSE = (1,25 \times 3 \times 15,41) + 46,16 = 103,94$$

Na Tabela 4.9 são apresentados os valores resultantes dos cálculos para a obtenção de todos os LSE.

Tabela 4.9 – Limite superior de especificação para as diferentes combinações terminal-fio

[mm <sup>2</sup> ]	T. de monitorização	Multifilares [n]	Média (û)	σ	LSE	û + 3* σ
0,13	50 Cravamentos	14	46,16	15,41	103,94	92,39
0,35	100 Cravamentos	7	37,79	8,63	70,15	63,68
	50 Cravamentos	7	36,29	8,74	69,07	62,51
0,5	50 Cravamentos	19	28,29	12,33	74,55	65,30
1	100 Cravamentos	32	27,29	14,48	81,59	70,73
	50 Cravamentos	32	27,82	13,27	77,58	67,63

Neste ponto, sabe-se que o valor de CDA-L terá sempre que ser inferior a 125 por forma a obtermos melhorias na deteção de não conformidades. Olhando aos resultados, o valor ideal de limite pode neste momento ser definido para um valor semelhante ao resultado para a combinação terminal-fio de secção 0,13 mm<sup>2</sup>. Um limite abaixo deste valor levaria à probabilidade de cravamentos conformes virem a ser detetados como não conformes. Qualquer erro resultante de um cravamento para o desvio da curva de cravamento face à de referência, que se encontrasse até aqui abaixo de 125 mas acima de cerca de 100, passaria agora a ser apresentado como um erro perante o sistema de monitorização B.

Em conversação com os responsáveis de processo da organização onde os equipamentos se encontram instalados e foram consequentemente testados, chegou-se de facto ao acordo de fixar o limite de deteção para o erro num valor igual a 100, CDA-L = 100. Posto isto, é de notar que não existe nenhuma razão científica associada a determinação exata do valor limite, mas que com base nos valores resultantes de LSE foi possível chegar a um valor limite inferior a 125, e o qual permite chegar a probabilidades inferiores para a não deteção de cravamentos não conformes. Estas serão apresentadas mais a frente neste ponto.

São vistas em seguidas na Figura 4.9, as curvas da normal resultantes dos testes de monitorização segundo o novo método de estudo para a combinação terminal-fio de secção 1 mm<sup>2</sup> com CDA-L = 100 e CDA-L = 125. Na vertical, a tracejado castanho são indicados os valores de CDA-L. É facilmente apontado que quando definido um CDA-L = 100, mais área das primeiras curvas da normal para erros de cravamento se encontra à direita do valor limite (curvas para a falta de 1 multifilar e 2 multifilares). Concluindo, menor é a probabilidade de não detetar esses erros de cravamento.

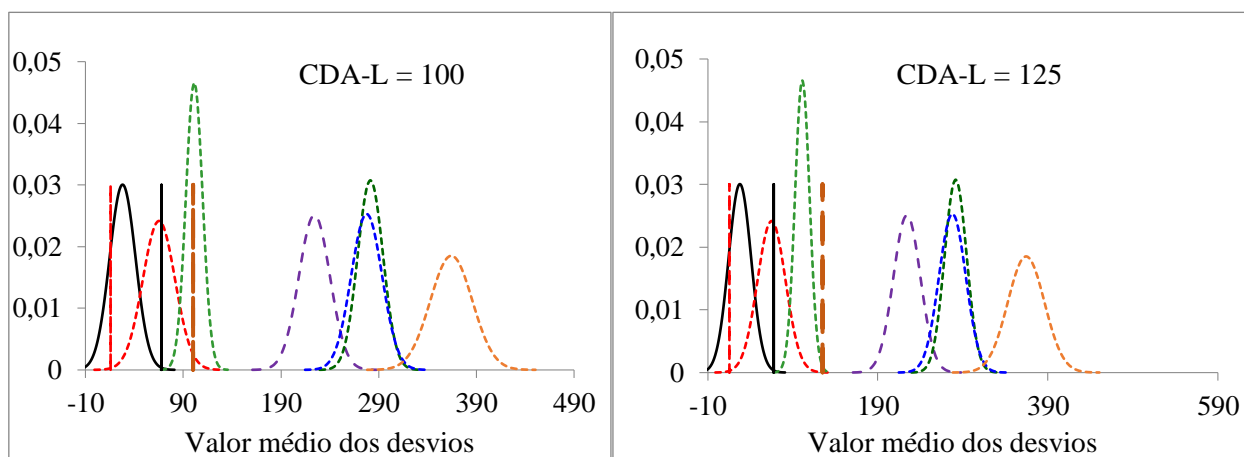


Figura 4.9 – Curva Normais para os valores resultantes do teste a combinação terminal fio 1 mm<sup>2</sup> com CDA-L = 100 e CDA-L = 125

As probabilidades para a não deteção de erros de cravamento de todas as combinações terminal-fio, são apresentadas na Tabela 4.10 e Tabela 4.11 para os erros do tipo falta de 1 multifilar e falta de 2 multifilares. Nestas são visíveis ambas as probabilidades para um CDA-L = 125 e CDA-L = 100 para os dois tipos de erros de cravamento, bem como as probabilidades para os mesmos dados pelos resultados obtidos aos testes no sistema de monitorização de forças de cravamento A. É confirmado o incremento na melhoria da deteção de não conformidades em ambas as tabelas.

Na Tabela 4.10 é vista uma pequena descida na probabilidade de não detetar erros por falta de 1 multifilar para a secção 1 mm<sup>2</sup>, que implica a efetiva melhoria. No entanto na probabilidade apresentada para o sistema de monitorização de forças de cravamento A face à resultante de CDA-L = 100 e 125 na secção de 0,50 mm<sup>2</sup>, existe uma diferença drástica. Esta justifica-se devido ao facto de no teste realizado para o sistema de monitorização de forças de cravamento B existirem apenas erros detetados após retirados 3 multifilares ao fio utilizado, enquanto no sistema A são detetados todos os erros por falta de multifilares. Colocando assim os valores para 1 e 2 multifilares abaixo do limite de deteção no sistema de monitorização de forças de cravamento B.

Tabela 4.10 – Probabilidades de não detetar não conformidades para a falta de 1 multifilar

[mm <sup>2</sup> ]	T. de monitorização	Multifilares	1 Multifilar em falta		
			CDA-L = 125	CDA-L = 100	Sist. Monit. A
0,13	50 Cravamentos	14	100,0%	100,0%	100,0%
0,35	100 Cravamentos	7	0,0%	0,0%	0,0%
	50 Cravamentos	7	0,0%	0,0%	0,0%
0,5	50 Cravamentos	19	100,0%	<b>100,0%</b>	<b>1,0%</b>
1	100 Cravamentos	32	100,0%	<b>96,0%</b>	100,0%
	50 Cravamentos	32	100,0%	<b>98,0%</b>	100,0%

Na Tabela 4.11 é vista uma grande diferença e consequente descida da probabilidade de não detetar erros por falta de 2 multifilar para a secção 1 mm<sup>2</sup>. Para a falta de 2 multifilares consegue-se assim obter resultados bastante melhores, e detetados desta forma mais cravamentos que passariam como conformes no sistema de monitorização de forças apesar de se saber serem defeituosos. Mais uma vez para as probabilidades de não detetar não conformidades apresentadas pelo sistema de monitorização de forças de cravamento A na combinação de terminal-fio de

secção 1 mm<sup>2</sup>, existem probabilidades inferiores às obtidas pelo sistema de monitorização de forças B para os testes realizados.

Tabela 4.11 - Probabilidades de não detetar não conformidades para a falta de 2 multifilares

[mm <sup>2</sup> ]	T. de monitorização	Multifilares	2 Multifilares em falta		
			CDA-L = 125	CDA-L = 100	Sist. Monit. A
0,13	50 Cravamentos	14	0,0%	0,0%	<b>1,0%</b>
0,35	100 Cravamentos	7	0,0%	0,0%	0,0%
	50 Cravamentos	7	0,0%	0,0%	0,0%
0,5	50 Cravamentos	19	100,0%	100,0%	<b>0,0%</b>
1	100 Cravamentos	32	<b>95,6%</b>	<b>30,9%</b>	<b>24,0%</b>
	50 Cravamentos	32	<b>100,0%</b>	<b>42,0%</b>	<b>24,0%</b>

As probabilidades apresentadas podem até ser menores por vezes no sistema de monitorização de forças de cravamento A para alguns tipos de erros, mas no sistema de monitorização de forças B predomina uma melhor separação de curvas da normal e dos resultados, que é realmente o que se tenta alcançar.

Esta evita que não suceda a existência de maiores probabilidades de cruzamentos das curvas da normal para o erro resultante com os limites para a deteção de erros. Ou o mais separado à esquerda do limite de deteção para os cravamentos conformes, ou o mais à direita do limite para cravamentos não conformes.

Para erros por falta de 3 e 4 multifilares, o estudo não é apresentado uma vez que todos os erros são já detetados, o que equivale a uma probabilidade de não deteção de erros ou não conformidades igual 0%.

Em modo de conclusão, verifica-se a melhoria por parte desta alteração ao limite de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B. Testes futuros com resultados de curvas da normal para os tipos de erro ensaiados mais perto da linha limite apresentariam mais cravamentos como defeituosos.

#### 4.4 Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R)

Como foi descrito no capítulo 3, e seguindo a metodologia apresentada, foram recolhidos dados para o erro de cravamentos obtidos por 3 operadores. Na Tabela 4.12 são apresentados os dados recolhidos para o sistema de monitorização de forças de cravamento B.

Tabela 4.12 – Dados recolhidos - Estudo R&R

		Lote				
		1A... 1L	2A... 2L	3A... 3L	4A... 4L	5A... 5L
Operador	Operador 1	37,07	31,80	37,50	88,10	53,10
		25,80	26,10	48,50	97,40	51,80
		26,60	26,10	33,30	49,60	53,33
		58,80	42,30	33,10	78,37	55,10
	Operador 2	98,80	92,60	51,50	63,00	31,30
		40,80	64,50	30,30	52,13	37,50
		47,50	26,30	49,10	57,80	28,00
		31,00	84,30	48,00	35,60	69,10
	Operador 3	54,00	29,30	37,80	71,30	24,30
		25,30	70,00	28,80	52,00	46,10
		30,50	36,00	37,00	92,10	40,10
		47,60	45,10	66,30	81,50	72,10

Em seguida foi feito o recurso à ferramenta de *software* Minitab, para obter os resultados da tabela ANOVA para o estudo R&R não replicável. Na Tabela 4.13, são vistos os valores resultantes da ANOVA R&R. Os valores expostos na coluna SS equivalem às equações (2.2), (2.3), (2.4) e (2.5) apresentadas no ponto 2.4.1 do capítulo 2.

Tabela 4.13 – ANOVA R&R

FV	SS	GL	MS	F <sub>0</sub>	F <sub>crít.</sub>
Operador	185,01	2	92,51	0,11	3,89
Lote hierarquizado ao operador	10512,28	12	876,02	2,85	1,97
Erro	13849,42	45	307,76	-	-
Total	24546,71	59	-	-	-

Pela coluna da estatística de teste  $F_0$  são possíveis de realizar dois testes aos valores resultantes. Para a diferença entre operadores, com um  $\alpha = 5\%$ ,  $F_{\text{crít.}}$  é dado por  $F_{0,95;2;12} = 3,89$ . Como o valor de  $F_0 < F_{\text{crít.}}$ , não existem evidências para rejeitar a hipótese nula definida pela equação (3.12) para a diferença entre avaliadores e com um  $\alpha = 5\%$ . Os valores obtidos por cada operador não são significativamente diferentes.

Para o teste à diferença entre corridas, com um  $\alpha = 5\%$ ,  $F_{\text{crít.}}$  é dado por  $F_{0,95;12;45} = 1,97$ . Como o valor de  $F_0 > F_{\text{crít.}}$ , rejeita-se desta forma a hipótese nula dada pela equação (3.14) para a diferença entre corridas e com um  $\alpha = 5\%$ . Para os valores obtidos entre corridas existe grande variabilidade, e assim são significativamente diferentes.

Neste momento, existem assim condições de passar à fase seguinte e obter os valores necessários ao estudo da repetibilidade e reprodutibilidade propriamente dito, e determinar a variabilidade associada ao sistema de monitorização de forças de cravamento. São apresentados os cálculos em seguida para a obtenção das diversas fontes de variação.

Para a variação no equipamento ou repetibilidade, efetuou-se o cálculo segundo a equação (2.6):

$$VE = \sqrt{307,76} = 17,54$$

Na variação no operador ou reprodutibilidade o cálculo é dado pela equação (2.7), com um número de lotes  $b=5$  e número de réplicas por lote  $n=4$ :

$$VO = \sqrt{\frac{92,51 - 876,02}{5 \times 4}} = 0$$

Por vezes pode acontecer não ser possível realizar o cálculo por existirem parcelas negativas, como é o caso. Assume-se assim um valor igual a zero.

A variância dos lotes hierarquizados ao operador ou entre peças resulta da equação (2.9):

$$VP = \sqrt{\frac{876,02 - 307,76}{4}} = 11,92$$

Calculou-se a variação do processo associado ao sistema de monitorização, utilizando a equação (2.10):

$$R\&R = \sqrt{17,54^2 + 0^2} = 17,54$$

Por fim, obteve-se a variação total do processo, através da equação (2.8):

$$VT = \sqrt{11,92^2 + 17,54^2} = 21,21$$

O resumo dos cálculos efetuados no estudo R&R é apresentado na Tabela 4.14. Os cálculos das percentagens de variação de cada fonte de variação identificada, em relação à variação total e de tolerâncias, por forma a verificar se o equipamento é aceitável ou não aceitável são também apresentados e seguindo o formulado na Tabela 3.8.

Tabela 4.14 – Percentagens de contribuição de variação e tolerância Estudo R&R

Fonte de Variação	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	% De Variação	%Tolerância
<b>Repetibilidade</b>	17,54	82,72	42,10
<b>Reprodutibilidade</b>	0	0	0,00
<b>Peça</b>	11,92	56,20	28,61
<b>RR</b>	17,54	82,72	42,10
<b>Total</b>	21,21	100	50,90

Analisando o resultado obtido para a %R&R de variação face ao total, é verificado que o sistema de monitorização de forças de cravamento B não é aceitável nestas condições, uma vez que o valor é superior aos 30% admissíveis. A %R&R representa 82,72% da variação total estudada, isto significa que estatisticamente a maioria da variação provém do sistema de monitorização (repetibilidade) ou operador (reprodutibilidade). Da mesma forma a percentagem de tolerância da componente R&R é mais uma vez superior a 30%. O sistema de monitorização apresenta uma repetibilidade alta e uma reprodutibilidade desprezável. O facto de a contribuição da reprodutibilidade em relação à variação total ser zero, é devido a nenhum dos operadores testar mais do que uma vez o mesmo cravamento.

Olhando aos resultados obtidos graficamente através da ferramenta de *software* Minitab, podemos retirar diversas conclusões. Na Figura 4.10 são vistas as contribuições das componentes de variação, que mostra as variações R&R e Repetibilidade como as maiores componentes tanto na variação total do processo como na tolerância. Um bom sistema deveria apresentar como maior componente de contribuição, a componente entre peças (*part-to-part*) que indicaria a capacidade de distinção de resultados entre peças pelo sistema.

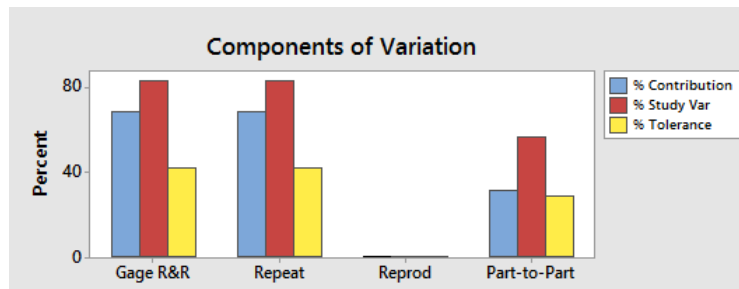


Figura 4.10 – Componentes de variação

A Figura 4.11 mostra a amplitude dos valores obtidos por cada operador por lote de cravamentos efetuados, e ajuda a perceber a consistência de resultados por operador. De forma ao sistema de monitorização ser aceitável, todos os pontos devem cair dentro dos limites de controlo indicados a vermelho no gráfico. Para o caso concreto verifica-se essa condição.

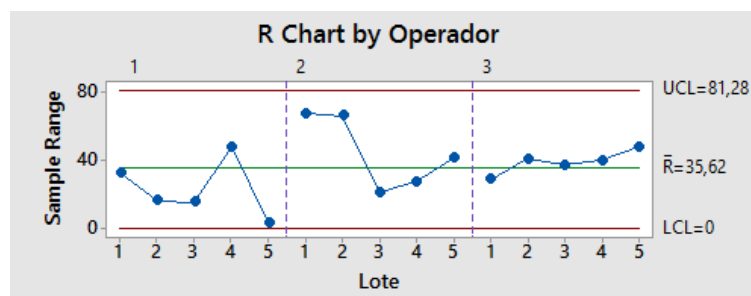


Figura 4.11 – Amplitude por operador-lote

Na Figura 4.12 são vistas as médias para os resultados obtidos por cada operador e por lote de cravamentos. A área entre limites de controlo representa a variação do sistema de monitorização (Skrivanek, 2009), o que significa que se muitos pontos caírem no interior das linhas de limite o sistema não terá a capacidade de fazer a distinção entre cravamentos medidos. Observando o gráfico da figura é verificado que apenas um ponto se encontra para além dos limites de controlo, assim mais uma vez o sistema é considerado desta forma inadequado não existindo a capacidade de distinção *part-to-part*.

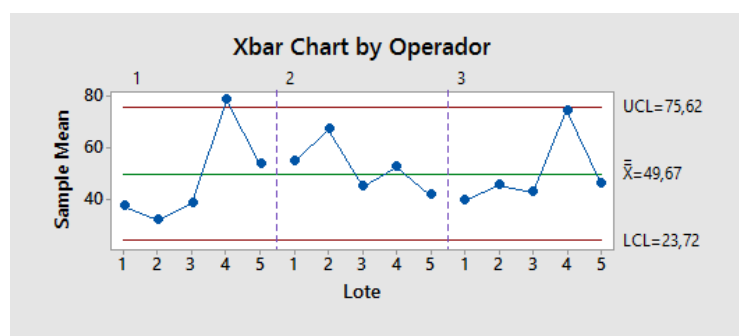


Figura 4.12 – Médias por operador-lote



Na Figura 4.13 é possível ver a relação entre resultados individuais obtidos por lote de cravamentos e cada um dos 3 operadores. Aqui verifica-se que existe variação elevada entre resultados, e como todas as medições foram obtidas através de cravamentos individuais entre operadores e destrutíveis, não nos permite tirar informações relevantes ao estudo.

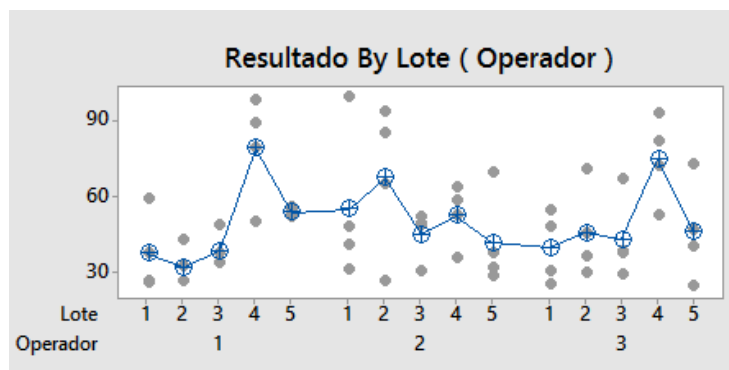


Figura 4.13 – Resultados individuais por operador-lote

Os resultados médios de todos os valores obtidos por cada operador são vistos na Figura 4.14. Através do gráfico é visto que os três operadores apresentam médias similares, com uma variação do operador 1 ligeiramente inferior.

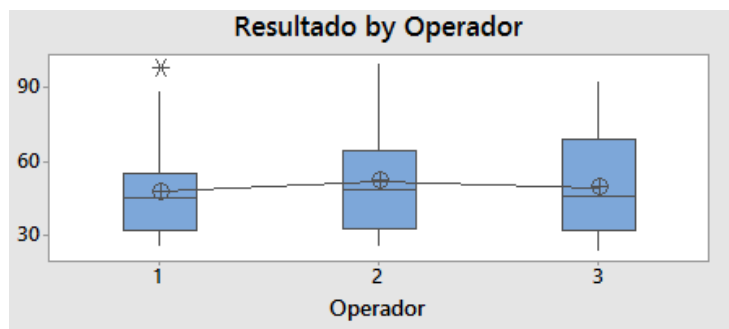


Figura 4.14 – Resultados por operador

Calculou-se o número de classes que o sistema de monitorização de forças de cravamento B consegue distinguir, utilizando a equação (3.16):

$$NC = 1.41 \times \frac{11,92}{17,54} = 0,96 \cong 1$$

Analisando o valor resultante verifica-se que o sistema é inadequado para estimar os parâmetros do processo, pois apenas consegue distinguir uma classe de dados.

Concluindo, tudo aponta para o sistema de monitorização não ter capacidade para realizar medições ao erro de cravamentos. Num estudo R&R é necessário existir variação nos resultados, uma vez tratar-se de um estudo de variação. Para o caso de estudo não existe essa variação

necessário entre resultados e de cravamento para cravamento. Isto significa que o sistema nunca consegue distinguir entre os resultados obtidos.

## 4.5 Estudo das características dinâmicas de Taguchi

Foram recolhidos os dados para o estudo das características dinâmicas para os sistemas de monitorização de forças de cravamento A e B seguindo a metodologia apresentada no ponto 3.7.

### 4.5.1 Razão sinal-ruído - Sistema de monitorização de forças de cravamento A

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento A, os dados recolhidos são apresentados na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Dados recolhidos - características dinâmicas sistema de monitorização A

	M1	M2	M3
	1 mm <sup>2</sup>	0,50 mm <sup>2</sup>	0,13 mm <sup>2</sup>
<b>Leituras</b>	27	27	31
	18	32	28
	19	28	36
	23	24	40
	15	36	29
	17	33	38
	23	28	46
	21	38	34
	23	27	37
	24	27	34
<b>Total (y<sub>i</sub>)</b>	210	300	353

Com os dados recolhidos são feitos os cálculos que levam à obtenção da razão sinal-ruído para o sistema de monitorização de forças de cravamento A. Para o estudo das características dinâmicas são apresentados os cálculos em seguida para os diversos parâmetros.

Em primeiro lugar foi calculada a média dos sinais de entrada  $\bar{M}$ , pela equação (2.13). Considerando que,

i = 1, 2, 3, k = 3 número de níveis do fator sinal.

j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, r<sub>0</sub>, número de observações para cada nível do fator.

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i}{k} = \frac{1 + 0,50 + 0,13}{3} = 0,54333$$

Posto isto é possível calcular o declive da reta  $\beta$ , pela equação (2.15):

$$\begin{aligned}\hat{\beta} &= \frac{\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})y_i}{r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2} = \\ &= \frac{(1 - 0,54333) \times 210 + (0,50 - 0,54333) \times 300 + (0,13 - 0,54333) \times 353}{10 \times ((1 - 0,54333)^2 + (0,50 - 0,54333)^2 + (0,13 - 0,54333)^2)} \\ &= -16,5256\end{aligned}$$

Para cálculos posteriores é necessário ter em conta o cálculo de  $r$ , pela equação (2.16):

$$\begin{aligned}r &= r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2 = 10 \times ((1 - 0,54333)^2 + (0,50 - 0,54333)^2 + (0,13 - 0,54333)^2) \\ &= 3,812667\end{aligned}$$

De seguida, calculou-se  $S_T$  pela equação (2.18):

$$\begin{aligned}S_T &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{ij})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k y_i)^2}{kr_0} = (27^2 + 18^2 + 19^2 + \dots + 34^2) - \frac{210^2 + 300^2 + 353^2}{3 \times 10} \\ &= 17815,37\end{aligned}$$

A variação produzida pelo efeito linear de  $\beta$  é obtida utilizando a equação (2.19):

$$\begin{aligned}S_\beta &= \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^k (y_i(M_i - \bar{M})) \right)^2 \\ &= \frac{1}{3,812667} \times ((1 - 0,54333) \times 210 + (0,50 - 0,54333) \times 300 \\ &\quad + (0,13 - 0,54333) \times 353)^2 = 1041,224\end{aligned}$$

Para a soma dos quadrados e cálculo da variação do erro  $S_e$ , faz-se uso da equação (2.20):

$$S_e = S_T - S_\beta = 17815,37 - 1041,224 = 16774,14$$

E a variância do erro é dada por a equação (2.21):

$$V_e = \frac{1}{kr_0 - 2} S_e = \frac{S_e}{v_e} = \frac{1}{(3 \times 10 - 2)} \times 16774,14 = 599,0765$$

Por fim calculou-se a razão sinal-ruído (S/N) para a característica dinâmica, o erro de cravamento, no sistema de monitorização de forças de cravamento A utilizando para isso a equação (2.22):

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 10 \log \frac{\frac{1}{r}(S_\beta - V_e)}{V_e} = 10 \log(\eta) = 10 \log \times \frac{\frac{1}{3,812667}(1041,224 - 599,0765)}{599,0765} = -7,13144$$

Na Figura 4.15 é apresentada a reta sinal-resposta vista graficamente, onde é possível verificar o comportamento dinâmico quando se altera o nível do sinal de entrada. Os sinais de entrada correspondem aos valores do fator área da secção do fio, que são colocados no eixo das abcissas, e de forma inversa como explicado anteriormente, ou seja da maior área para a mais pequena, de 1 mm<sup>2</sup> para 0,13 mm<sup>2</sup>.

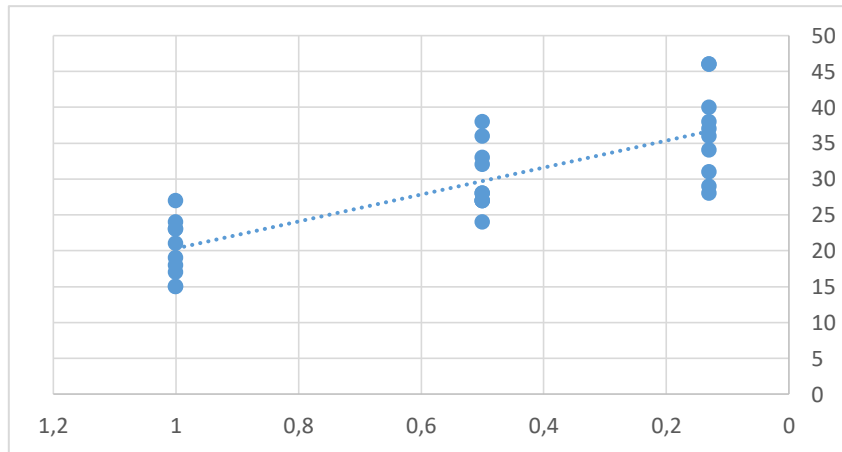


Figura 4.15 – Sinal-Resposta Sistema de monitorização de forças A

Verifica-se o aumento do erro quanto menor a área de secção do fio utilizado. Graficamente é visto assim um declive positivo, mas os cálculos continuam a ser efetuados da mesma forma habitual, então o declive  $\beta$  resulta desta forma negativo.

#### 4.5.2 Razão sinal-ruído - Sistema de monitorização de forças de cravamento B

Para o sistema de monitorização de forças de cravamento B, os dados recolhidos são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 – Dados recolhidos - características dinâmicas sistema de monitorização B

	M1	M2	M3
	1 mm <sup>2</sup>	0,50 mm <sup>2</sup>	0,13 mm <sup>2</sup>
<b>Leituras</b>	23,5	39,3	47,6
	33,8	29,3	52
	25,5	38,3	40,1
	25,1	42,6	48,5
	32,1	38,6	43,5
	32,5	31,8	41,3
	20	36,6	43,8
	20,3	32,3	51
	18,4	38,1	49,5
	19,8	35,8	42,1
<b>Total (y<sub>i</sub>)</b>	251	362,7	459,4

Repetiu-se o mesmo procedimento dos cálculos das características dinâmicas de Taguchi do sistema de monitorização de forças de cravamento A para os dados reunidos para o sistema de monitorização de forças de cravamento B e obtida a correspondente razão sinal-ruído. São de seguida apresentados os cálculos para os diversos parâmetros.

Para a média dos sinais de entrada  $\bar{M}$ , dada pela equação (2.13) e considerando,

i = 1, 2, 3, k = 3 número de níveis do fator sinal

j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, r<sub>0</sub>, número de observações para cada nível do fator

$$\bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^k M_i}{k} = \frac{1 + 0,50 + 0,13}{3} = 0,54333$$

Para o cálculo do declive da reta  $\beta$ , pela equação (2.15) vem:

$$\begin{aligned}\hat{\beta} &= \frac{\sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M}) y_i}{r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2} = \\ &= \frac{(1 - 0,54333) \times 251 + (0,50 - 0,54333) \times 362,7 + (0,13 - 0,54333) \times 459,4}{10 \times ((1 - 0,54333)^2 + (0,50 - 0,54333)^2 + (0,13 - 0,54333)^2)} \\ &= -23,8623\end{aligned}$$

Novamente, é necessário ter em conta o cálculo de  $r$ , pela equação (2.16):

$$\begin{aligned}r &= r_0 \sum_{i=1}^k (M_i - \bar{M})^2 = 10 \times ((1 - 0,54333)^2 + (0,50 - 0,54333)^2 + (0,13 - 0,54333)^2) \\ &= 3,812667\end{aligned}$$

O cálculo de  $S_T$  resulta da equação (2.18):

$$\begin{aligned}S_T &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{r_0} (y_{ij})^2 - \frac{(\sum_{i=1}^k y_i)^2}{k r_0} \\ &= (23,5^2 + 33,8^2 + 25,5^2 + \dots + 42,1^2) - \frac{251^2 + 362,7^2 + 459,4^2}{3 \times 10} \\ &= 27656,27\end{aligned}$$

Para a variação produzida pelo efeito linear de  $\beta$  pela equação (2.19):

$$\begin{aligned}S_\beta &= \frac{1}{r} \left( \sum_{i=1}^k (y_i (M_i - \bar{M})) \right)^2 \\ &= \frac{1}{3,812667} \times ((1 - 0,54333) \times 251 + (0,50 - 0,54333) \times 362,7 + (0,13 - 0,54333) \times 459,4)^2 = 2170,968\end{aligned}$$

A soma dos quadrados e cálculo da variação do erro  $S_e$ , pela equação (2.20):

$$S_e = S_T - S_\beta = 27656,27 - 2170,968 = 25485,3$$

Em seguida calculou-se a variância do erro, com a equação (2.21):

$$V_e = \frac{1}{kr_0 - 2} S_e = \frac{S_e}{v_e} = \frac{1}{(3 \times 10 - 2)} \times 25485,3 = 910,1893$$

Finalmente, calculou-se a razão sinal-ruído (S/N) para a característica dinâmica, o erro de cravamento, no sistema de monitorização de forças de cravamento B utilizando a equação (2.22):

$$(S/N) = 10 \log \frac{\frac{1}{r} (S_\beta - V_e)}{V_e} = 10 \log(\eta) = 10 \log \times \frac{\frac{1}{3,812667} (2170,968 - 910,1893)}{910,1893} = -4,39722$$

Na Figura 4.16 é apresentada a reta sinal-resposta vista graficamente, verificando o comportamento dinâmico da alteração do nível do sinal de entrada.

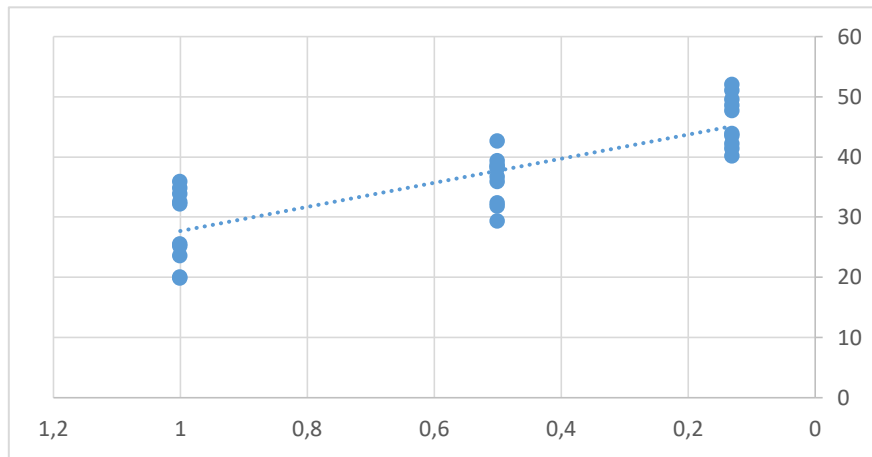


Figura 4.16 – Sinal resposta Sistema de monitorização de forças B

Verifica-se para o sistema de monitorização B de igual forma o aumento do erro quanto menor a área de secção do fio utilizado.

Calculadas as duas razões sinal-ruído (S/N) para cada gama de valores recolhida por cada sistema, para o sistema de monitorização de forças de cravamento A e sistema de monitorização de forças de cravamento B, e procurando aquela que maximiza o sinal face ao ruído do processo, verifica-se que o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresenta o maior índice de resposta face ao ruído e é assim o melhor dos dois sistemas de monitorização para o estudo realizado.





## 5. Conclusão

Defeitos de qualidade são algo iminente em qualquer processo de fabrico realizado, assim existe todo o interesse em fazer decrescer o número das não conformidades possíveis de encontrar. Para o estudo que foi realizado nesta dissertação, foi visto como no cravamento de terminais metálicos na indústria automóvel é possível responder a essa necessidade utilizando sistemas de monitorização de forças de cravamento.

O trabalho realizado teve como grande objetivo a comparação de resultados de monitorização de cravamentos obtidos por um novo sistema de monitorização de forças de cravamento, com os resultados para um antigo sistema de monitorização e atualmente utilizado na produção de cravamentos em fábrica.

Foi ainda procurado um novo método de recolha de dados para o teste de monitorização efetuado com recurso a qualquer um dos dois sistemas de monitorização de forças estudados. E para o novo sistema de monitorização de forças de cravamento B definido um novo limite de deteção para o erro de cravamentos não conformes.

Adicionalmente tentou-se perceber até que ponto este novo sistema de monitorização de forças de cravamento era de facto fiável quanto à sua deteção de não conformidades em cravamentos e efetivamente o melhor dos dois, fazendo o uso dos estudos de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R), e das características dinâmicas de Taguchi para o sistema de monitorização que máxima a característica em estudo e maior capacidade apresenta para o índice de resposta face ao ruído.

Para o trabalho realizado foi necessário ter sempre em conta a variação resultante do operador. Os dados obtidos nas experimentações e testes são feitos manualmente por parte do operador, onde basta fazer um pouco mais de pressão ao colocar o fio no terminal a cravar ou tremer ligeiramente para o fio se deslocar imediatamente, e o valor resultante do erro de cravamento ser já muito diferente do anterior e do esperado.

Obtendo todos os dados e realizados os respetivos estudos, foram obtidas as seguintes conclusões.

Relativamente aos sistemas de monitorização de forças de cravamento estudados, é visto que existem algumas vantagens quanto à implementação do sistema de monitorização B. Este é um sistema mais moderno e com uma *interface* feita através do uso de um ecrã tátil e intuitivo, contrariamente ao sistema de monitorização A onde o ecrã é bastante pequeno e tudo é realizado por botões no sistema. O sistema de monitorização B permite que possa ser feita em fábrica uma

gestão em rede dos diversos locais de produção registando todos os erros de cravamentos obtidos por cada sistema de monitorização de forças presente a cada instante e fazendo estatísticas por locais de trabalho e como se encontra a produção, percebendo se um problema pode ser proveniente de um sistema de monitorização de forças ou mesmo de um operador numa determinada estação. Permite também face ao sistema de monitorização de forças de cravamento A, uma recolha de dados facilmente por uma *pen usb* ou ligação direta a um computador para a análise de resultados, e ainda inserir comentários a cravamentos diretamente no sistema, comentando por exemplo quanto ao que ocorreu num processo de cravamento que levou à ocorrência de uma não conformidade.

A única desvantagem encontrada quanto ao sistema de monitorização de forças de cravamento B face ao sistema de monitorização A, adveio do facto de as zonas de erros de cravamento obtidas no sistema de monitorização B não apresentarem os valores de desvio de erros em número para cada zona individual como acontecia no sistema de monitorização A e que permitia perceber de que zona do terminal resultou um erro acima do limite e a não conformidade. No entanto é possível sempre verificar com os dados do ficheiro obtido por o sistema de monitorização B cada curva individualmente com recurso a um computador e quando necessário, e averiguar onde as mesmas apresentam maiores diferenças em relação à curva de referência de forças de cravamento. Para o sistema de monitorização de forças de cravamento A, a observação da curva é feita apenas no momento do cravamento e apenas no ecrã do sistema.

Para o novo método de teste aos sistemas de monitorização de forças de cravamento procurado, verificou-se a vantagem na utilização desse novo método e o mesmo foi comprovado como não significativamente diferente face ao método padrão de teste para a recolha de valores de erros de cravamento. Utilizando apenas metade das dimensões das amostras para cravamentos tanto conformes como não conformes, os resultados das médias para o erro obtidos são considerados de igual forma viáveis.

Curvas completamente separadas e distantes indicam melhor capacidade de monitorização. Relativamente ao estudo da comparação de resultados de monitorização para os sistemas de monitorização de forças de cravamento A e B, verificou-se para a combinação terminal-fio de secção  $0,13 \text{ mm}^2$  uma melhor deteção de erros de cravamento monitorizados pelo sistema de monitorização de forças B e a separação de forma ideal das curvas da normal para os erros de cravamento. Na combinação estudada de  $0,35 \text{ mm}^2$ , o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresentou de igual forma os melhores resultados para a separação entre curvas normais de erros e não conformidades encontradas.

Ao monitorizar a combinação terminal-fio de secção  $0,50 \text{ mm}^2$  verificou-se a melhor deteção de erros de cravamento para os dados recolhidos durante o teste de monitorização ao

sistema de monitorização de forças de cravamento A. No entanto para o sistema de monitorização B a separação entre curvas é apresentada como a ideal e a que se tenta ir ao encontro, e com os tipos de erros por falta de multifilares que o sistema não conseguiu monitorizar a representar até 10% da falta de material no interior do fio utilizado. Sabendo esta falta de material, multifilares, não ser significativa na capacidade elétrica de um terminal cravado podemos afirmar desta forma a melhor monitorização por parte do sistema de monitorização de forças de cravamento B. Igualmente para a secção igual a  $1 \text{ mm}^2$ , a mesma conclusão pode ser retirada tendo em conta a separação entre curvas e falta de multifilares significativos.

Para o estudo do limite ideal de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B, conseguiu ser encontrado um novo valor para o limite de deteção por forma a não comprometer a monitorização de erros. Com um ponto para o limite no qual era possível detetar erros sem expor a gama de valores para cravamentos conformes e para o número de multifilares necessários de retirar até a deteção acontecer no sistema. O limite encontrado é igual a  $\text{CDA-L} = 100$ . Este novo limite, inferior ao prévio, tem assim dessa forma a capacidade de fazer a deteção de erros de cravamento para mais classes de tipos de erro e com menor probabilidade de os erros de cravamento resultante de cada classe não serem detetados.

No estudo R&R realizado quanto à capacidade de medição de erros no sistema de monitorização de forças de cravamento B por diversos operadores, foi chegada à conclusão de que o sistema não tem a capacidade para distinguir de forma fiável entre resultados obtidos de erros de cravamentos. De facto, qualquer sistema de monitorização de forças de cravamento estudado pelo método R&R é de supor que nunca venha a ser viável para a medição de erros face à metodologia de cravamento manual praticada pelo operador. Os valores obtidos sofrem uma elevada variação devido ao operador. A diferença entre valores para diferentes erros de cravamento obtidos é bastante elevada, nunca medindo dois erros de cravamento de forma considerada igual. De notar no entanto que todos os resultados para o erro de cravamento obtidos para o estudo R&R realizado se encontram abaixo do limite de deteção para o erro no sistema de monitorização de forças de cravamento B, o que valida na perspetiva do limite superior de especificação do processo a capacidade em detetar não conformidades no sistema.

Por fim, relativamente ao estudo das características dinâmicas pelo método de Taguchi realizado em ambos sistemas de monitorização de forças de cravamento A e B, foi possível verificar calculando as razões sinal-ruído (S/N) que o sistema de monitorização de forças de cravamento B apresenta o maior índice de resposta face ao ruído relativamente ao sistema de monitorização A para os dados recolhidos. O sistema de monitorização de forças de cravamento B é dado por este estudo como melhor equipamento de monitorização de erros de cravamento.

Conclui-se então, após vários testes e experiências realizadas nos sistemas de monitorização de forças de cravamento A e B, que o sistema de monitorização de forças de cravamento B é aquele que de melhor forma monitoriza e tem capacidade tanto de detetar cravamentos conformes como de detetar não conformidades. Com a separação ideal entre curvas de cravamento e as curvas de referência para cravamentos não conformes. A instalação do novo sistema de monitorização de forças de cravamento em plantas de produção é aconselhada para o trabalho realizado.

Em estudo futuros, seria interessante desenvolver um método que permitisse ao operador ao fazer o cravamento de terminais de forma manual, conseguir obter uma menor variação nos resultados obtidos. Só uma estrutura construída que permitisse colocar sempre um fio num terminal da mesma forma e na mesma posição sem muita diferença significativa levaria à possibilidade de obter tais resultados.

## Referências Bibliográficas

- AIAG. (2010). Measurement Systems Analysis, 4ª Edição. Chrysler Group LLC.
- Anjos, A. D. (2004). Planejamento de Experimentos II, Universidade Federal do Paraná.
- Circuitmaster Designs. (2010). cfa1000m/b Installation & Operating Instructions. Circuitmaster Designs Ltd.
- Cramer, K. E., Perey, D. F., & Yost, W. T. (2007). A Method For The Verification Of Wire Crimp Compression Using Ultrasonic Inspection. NASA Langley Research Center, Hampton, VA.
- Doyon, P., & Schuetz, P. (2008). Crimping 101. Consultado em Setembro 1, 2016, de <https://www.pddnet.com/article/2008/07/crimping-101>.
- Empresa - Relatório Interno. (2009). Crimping Manual.
- Jorge, F. D. S. (2010). Métodos de Taguchi Aplicados à Análise Cromatográfica na Identificação de Isocianatos. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- JST Connector's. (2005). Precaution for Crimping Process. J.S.T. Mfg. Co.,Ltd.
- Komax. (1998). Operating Instructions, Crimp force analyser. komax AG.
- McNeese, B. (2012). ANOVA Gage R&R - Part 1. Consultado em Março 10, 2017, de <https://www.spcforexcel.com/knowledge/measurement-systems-analysis/anova-gage-rr-part-1>.
- Melo, R. A. (2014). Análise da influência das variáveis do processo de furação de materiais compósitos sobre o dano através do método de Taguchi com características dinâmicas. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Melrose, J., Perroy, R., & Careas, S. (2015). Stripping. Statewide Agricultural Land Use Baseline 2015 - Weidmuller.
- Molex. (2009). Quality Crimping Handbook Order No. 63800-0029. Molex.
- Molex. (2013). Crimp Force Monitor Instruction Manual Order No. 63800-7950. Molex.
- Nascimento, B. M. M. (2016). Plataforma de apoio à decisão para análise e Solução de erros de cravamento. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica e de Computadores - Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia.

- Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2012). Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos. FFCT.
- Portal Action. (2010). RR Não-Replicável (Método Hierárquico). Consultado em Janeiro 17, 2017, de <http://www.portalaction.com.br/analise-dos-sistemas-de-medicao/32-rr-nao-replicavel-metodo-hierarquico>.
- Ramesh, B., & Sarma, K. V. S. (2013). The estimation of variance components in analysis of variance. International Journal of Scientific & Engineering Research (Vol. 4). IJSER.
- Fischer Connectors. (2013). Crimping Instructions , Assembly Instructions. Fischer Connectors SA.
- SEMATECH. (1995). Evaluating Automated Wafer Measurement Instruments. Characterization: Present Status and Future Needs. SEMATECH, Inc.
- Skrivanek, S. (2009). How to Conduct an MSA When the Part is Destroyed During Measurement. MoreSteam, LLC.
- TE Connectivity. (2014a). Application Tooling and Equipment. TE Connectivity Ltd.
- TE Connectivity. (2014b). Crimp Theory Fundamentals: BASIC. Consultado em Agosto 1, 2016, de <https://www.youtube.com/watch?v=foFgl8c17so>.
- TE Connectivity. (2016). Applicators - Premium quality manufacturing of crimp connections. TE Connectivity Ltd.
- WireProcess Specialities. (2013). Terminal Crimping Technology. Consultado em Agosto 5, 2016, de <http://wireprocess.com/wordpress1/2013/06/25/terminal-crimp-technology/>
- Zeller, V. A. V. (2014). Quantificação das Características Influentes na Monitorização De Cravamento de Terminais Eléctricos na Indústria Automóvel. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica - Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Zhmurkin, D. V. (2009). 3-D Simulation of Open-Barrel Crimping Process, Study of the Effect of Serrations. Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts, (Setembro 2009).